
3 1761 07550906 7

À Monsieur I. Ototzky
Hommage de son tout dév
Henry

LA

DÉCOMPOSITION

DES MATIÈRES ORGANIQUES

ET

LES FORMES D'HUMUS

DANS LEURS RAPPORTS AVEC L'AGRICULTURE

LA DÉCOMPOSITION

DES MATIÈRES ORGANIQUES

ET

LES FORMES D'HUMUS

DANS LEURS RAPPORTS AVEC L'AGRICULTURE

Par E. WOLLNY

Professeur d'agriculture a l'Université de Munich

Traduit de l'allemand par E. HENRY

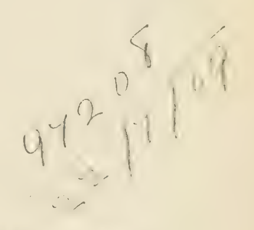
Professeur à l'École d'agriculture Mathieu de Dombasle et à l'École nationale des Eaux et Forêts

Préface de **L. GRANDEAU**, inspecteur général des Stations agronomiques

---

Avec 52 figures dans le texte





BERGER-LEVRAULT ET Cie, ÉDITEURS

PARIS	NANCY
5, RUE DES BEAUX-ARTS, 5	18, RUE DES GLACIS, 18

1902

PRÉFACE

Depuis un demi-siècle, l'orientation des recherches sur le rôle du sol dans la végétation a passé par des phases diverses. La terre a été considérée pendant longtemps comme un simple support des plantes ; sa constitution minéralogique et les caractères physiques du sol qui en étaient la conséquence entraient, pour ainsi dire, seuls en ligne de compte dans les préoccupations des agriculteurs. On ignorait les rapports étroits qui unissent le développement des végétaux à la composition chimique du sol. La fécondité de la terre, pensait-on alors, dépendait exclusivement de l'apport du fumier d'étable dont la valeur fertilisante était évaluée d'après la quantité de matière organique qu'il introduisait dans le champ.

Lorsqu'en 1840 J. de Liebig, dans une œuvre magistrale, établit que l'alimentation des plantes est essentiellement minérale, une ère nouvelle s'ouvrit pour l'agronomie. Des expériences décisives vinrent démontrer que tout organisme végétal exige, pour vivre et se développer, la présence, dans les milieux où il croît, d'une dizaine d'éléments chimiques simples, diversement associés dans le sol, dans l'air et dans les fumures. Les démonstrations s'accumulèrent pour fixer les idées dans une voie nou-

*

velle, sur les conditions prochaines de fertilité des sols, sur les moyens d'accroître leurs rendements par le choix judicieux d'assolements réglés sur les exigences diverses des récoltes, et par l'apport, sous forme d'engrais, de ceux des éléments minéraux qui leur font défaut. La doctrine de la nutrition minérale devenait la base solide de tout progrès agricole.

L'observation a, d'autre part, montré aux cultivateurs l'influence heureuse qu'exerce sur la fertilité des terres la présence des résidus organiques (racines, feuilles, etc.), accumulés dans le sol et transformés plus ou moins complètement en une substance complexe qu'on nomme *terreau* ou *humus*. La nature de cette substance a été signalée vers 1802, par les recherches classiques de Th. de Saussure, à l'attention des agronomes et pendant bien longtemps on n'a eu d'autres indications sur l'humus que celles qu'on devait à l'éminent naturaliste genevois. Au cours du dernier tiers du XIXe siècle seulement, de nombreuses recherches sont venues éclairer le mode de formation des différents humus, les modifications qu'ils impriment à l'action des éléments minéraux sur la nutrition de la plante et l'influence qu'ils exercent sur les propriétés physiques des sols. Enfin, les révélations de Pasteur sur le rôle gigantesque des infiniment petits ont été le point de départ de la découverte des processus de la nitrification, de la fixation de l'azote par les légumineuses, de la putréfaction des matières organiques dans le sol, des fermentations dont il est le siège, etc.

Un nombre considérable de recherches ont été entre-

prises sur les phénomènes si complexes de la décomposition des matières organiques dans les sols agricoles et forestiers; on a étudié le rôle des micro-organismes dans les transformations des engrais introduits dans nos champs. Les résultats de ces recherches, épars dans les recueils scientifiques français et étrangers, n'avaient donné lieu jusqu'ici à aucune publication d'ensemble présentant, à côté de l'analyse des faits constatés, une discussion critique de la valeur des observations.

Cette publication, dont M. Ed. Henry présente aujourd'hui une excellente traduction au public agricole et forestier, a été entreprise par Ewald Wollny, professeur à l'Université de Munich, dont les travaux personnels ont enrichi si notablement ce chapitre important de la science agronomique, et que mieux qu'aucun autre savant il pouvait mener à bien.

E. Wollny, né le 20 mars 1846, à Berlin, s'est voué, dès le début de sa carrière, à l'étude expérimentale du rôle des agents physiques : chaleur, lumière, électricité, humidité de l'air, etc., sur la production des plantes de la grande culture et sur la formation et la fertilité des sols. Il a fait, dans ses travaux, une très large part à l'étude des décompositions de la matière organique dans le sol, et ses recherches originales ne forment pas le moindre appoint à l'œuvre importante que M. Ed. Henry offre aujourd'hui au public agricole et forestier.

Le lecteur qui jettera un coup d'œil sur la table des matières aura tout de suite une idée de l'intérêt considérable du livre de Wollny, mis entièrement au courant

de nos connaissances par les additions dont l'a enrichi M. Ed. Henry.

L'ouvrage est divisé en trois parties. Dans la première. l'auteur étudie les réactions chimiques dont les matières organiques sont le siège dans l'érémacausis et dans la putréfaction; il décrit celles que leur impriment les micro-organismes ou qu'ils doivent à l'action de l'homme et des animaux. L'auteur, en un mot, passe en revue toutes les conditions qui provoquent les divers modes de décomposition. L'exposé est partout clair, précis, complet.

La deuxième partie traite des produits solides de décomposition des matières organiques, c'est-à-dire des *humus*, de leurs propriétés physiques et chimiques et de leur influence sur la fertilité des sols. Dans cette partie et dans la suivante, Wollny examine comment l'homme peut et doit intervenir dans les phénomènes pour mettre en œuvre à son profit les forces naturelles; l'agriculteur et le forestier y trouveront les plus utiles renseignements; ils apprendront à raisonner l'opportunité des travaux mécaniques du sol : labour, hersage, roulage, défonçage, drainage, etc., si souvent encore exécutés par routine ou à contresens. Les conditions du sol, d'humidité, de saison, de climat, dans lesquelles ces opérations doivent être effectuées pour donner les meilleurs résultats, sont mises en lumière par de nombreux exemples. La culture des sols tourbeux est traitée avec le plus grand soin. Bien que l'étendue des tourbières soit relativement faible dans notre pays, ce chapitre a, pour la France, un réel intérêt, la mise en valeur et le traite-

ment agricole de ces terrains appelant en France beaucoup de perfectionnements encore.

Les agriculteurs et les forestiers étudieront avec le plus grand profit cet exposé à la fois clair, méthodique et complet de l'ensemble des connaissances nécessaires pour les guider dans leurs travaux : l'auteur indique dans sa préface le but qu'il s'est proposé : *traiter le sujet assez simplement pour que l'agriculteur et le forestier, peu familiarisés avec les sciences naturelles et avec la chimie, puissent, à la suite d'une étude attentive, se faire une idée exacte des principes contenus dans son livre :* il y a parfaitement réussi.

M. Ed. Henry, dont les recherches personnelles ont contribué si largement à éclairer les questions relatives à la formation de l'humus des forêts, ne s'est pas borné, comme je l'ai dit plus haut, à offrir au public français une traduction fidèle et élégante de la dernière édition allemande, qui date de 1896. De nombreuses notes et un appendice complètent l'œuvre de Wollny, ainsi mise entièrement à jour par l'analyse de tous les travaux importants publiés jusqu'en 1900.

Wollny a donné tous ses soins à la bibliographie ; très au courant des travaux étrangers, il a indiqué, avec une exactitude et une impartialité qu'on ne rencontre pas toujours chez les auteurs, la part qui revient à chacun dans cet ensemble de recherches sur l'une des parties les plus intéressantes de l'agronomie.

Wollny a revu les épreuves de l'édition française, mais il n'aura pas la satisfaction d'assister au succès que l'on

peut, sans crainte d'être démenti, prédire à cette œuvre, fruit de vingt années d'expériences. La mort l'a frappé dans la plénitude de l'âge et du talent : il a succombé le 8 janvier 1901, après quelques jours seulement d'éloignement de son laboratoire, laissant de vifs regrets à tous ceux qui l'ont connu. Sa valeur morale, son savoir et son dévouement à l'agriculture, assurent à la mémoire du savant professeur de l'Université de Munich, un souvenir reconnaissant et durable.

Paris — Station agronomique de l'Est, juin 1901.

L. Grandeau.

PRÉFACE DE L'AUTEUR

Dans ce livre je me suis proposé d'exposer systématiquement les résultats de mes propres recherches et de celles des autres agronomes sur les processus de décomposition des matières organiques et sur les produits solides qui en résultent, c'est-à-dire les humus, et d'en déduire les principes sur lesquels doit s'appuyer une exploitation agricole ou forestière pour arriver à un traitement et à une utilisation rationnels de ces matières organiques produites et employées en si grandes quantités par l'agriculture et la sylviculture.

Dans le but de traiter à fond le sujet pour les besoins tant de la science que de la pratique et d'éveiller ainsi l'intérêt dans diverses directions, j'ai relaté non seulement les recherches faites dans le domaine de la chimie, mais encore celles qui, au point de vue bactériologique, physiologique et physique, servent à caractériser les réactions dont il s'agit. L'ouvrage que j'offre au public fournit donc des indications pour la culture du sol et aussi pour l'hygiène, la géologie et l'économie rurale ; il offre ainsi un intérêt plus général.

Bien que les faits établis jusqu'ici ne soient pas encore suffisants pour expliquer et prévoir dans tous les cas les phénomènes si compliqués de la nature, ils sont pourtant assez nombreux et assez importants pour qu'on ne puisse considérer comme prématuré l'essai que j'entreprends ici de faire un tout harmonique des résultats scientifiques non coordonnés jus-

qu'alors et de soumettre à la critique les opinions ou les théories qu'ils ont engendrées.

Je me suis efforcé de traiter le sujet assez simplement pour que l'agriculteur et le forestier, peu familiarisés avec les sciences naturelles et la chimie, puissent, à la suite d'une étude attentive, se faire une idée exacte des principes contenus dans ce livre.

Munich, 1er octobre 1896.

E. Wollny.

LA DÉCOMPOSITION

DES

MATIÈRES ORGANIQUES

ET LES FORMES D'HUMUS

DANS LEURS RAPPORTS AVEC L'AGRICULTURE

Les matières organiques employées comme engrais sous forme de débris végétaux ou animaux (fumiers, composts) ou sous forme de plantes vivantes (engrais verts), et celles qui existent naturellement dans le sol (déchets des récoltes, humus, cadavres d'animaux) ou à sa surface (couverture des forêts) subissent des modifications chimiques diverses qui influent à un haut degré sur sa fertilité. La connaissance des réactions qui interviennent offre, à côté de son intérêt scientifique, une utilité pratique considérable, puisque, par des procédés divers, l'homme peut exercer une influence capitale sur le cours de ces réactions et sur la qualité de leurs produits ultimes, où se rencontrent les principaux aliments des plantes.

Dans leur ensemble, ces processus de décomposition des matières organiques se classent en deux séries caractérisées surtout soit par la présence, soit par l'absence d'oxygène, donc par des phénomènes d'*oxydation* dans le premier cas, de *réduction* dans l'autre.

Suivant que ce sont les phénomènes d'oxydation qui dominent,

comme dans l'*érémacausis* ou bien ceux de réduction, comme dans la *putréfaction*, l'action des détritus organiques et des humus, dernier terme de leur décomposition, sera heureuse ou néfaste.

Cette action se manifeste tant sur les propriétés physiques que sur la composition chimique des sols et, en raison du retentissement profond qu'elle a sur leur puissance de production, l'agriculteur et le sylviculteur ont le devoir strict de régler l'influence des facteurs de la décomposition de manière à obtenir celle qui donne les meilleurs résultats à ce point de vue.

PREMIÈRE PARTIE

PROCESSUS CHIMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES

CHAPITRE I

PROCESSUS CHIMIQUES

La décomposition des matières organiques en présence de l'air atmosphérique donne naissance, sous certaines conditions, à de l'acide carbonique, de l'eau, de l'ammoniaque (et de l'azote libre) et les principes minéraux qui étaient en quelque sorte enfermés dans la matière organique et inassimilables à cet état deviennent libres et passent pour la plupart sous une forme assimilable. Il se produit donc, dans ces circonstances, des aliments essentiels immédiatement absorbables (ammoniaque, principes minéraux) ou des composés tels que l'acide carbonique dont l'action dissolvante sur les minéraux solubles du sol exerce une heureuse influence sur la fertilité.

1. — Érémacausis.

Ce mode de décomposition, que l'on désigne sous le nom d'*Érémacausis*[1], est caractérisé *par la volatilisation de la matière organique avec un résidu formé des matières minérales non volatiles passant, pour la plus grande partie, à l'état assimilable.*

L'intervention de l'oxygène de l'air est prouvée non seulement par ce fait que l'oxygène contenu dans les matières organiques

---

1. D'après E. W. Hilgard. De ἠρέμα, paisiblement, insensiblement, et de καῦσις, combustion.

serait bien loin de suffire à l'oxydation du carbone, mais encore par cette observation faite pour la première fois par LÉVY et BOUSSINGAULT[1] et, plus tard, par J. VON FODOR[2] que l'air occlus dans le sol s'appauvrit en oxygène d'autant qu'il s'enrichit en acide carbonique, si bien que les volumes d'oxygène et d'acide carbonique sont toujours sensiblement égaux. LÉVY et BOUSSINGAULT ont trouvé les rapports suivants :

SOL.	CULTURE.	CO^2.	O.	TOTAL.
Siliceux fumé	»	9,74	10,35	20,09
Siliceux	Vigne.	1,06	19,72	20,78
Sable avec nombreux cailloux.	Forêt.	0,87	19,61	20,48
Sol siliceux fumé.	Asperges	1,54	18,80	20,34
Excavation avec terre de bois.	»	3,64	16,45	20,09
Muschelkalk.	Betteraves. . . .	0,87	19,71	20,58
Argile noire.	Topinambours . .	0,66	19,99	20,65
Sol humide fertile	Prairie	1,79	19,41	21,20

J. VON FODOR a obtenu pour le taux d'oxygène et d'acide carbonique de l'air occlus dans le sol les chiffres suivants, moyennes de 19 analyses :

	CO^2.	O.	TOTAL.
Air occlus dans le sol	2,54	18,33	20,87
Air atmosphérique.	0,04	20,96	21,00

Le taux d'oxygène de l'air du sol diminuant dans la mesure où croît celui d'acide carbonique, on doit en conclure que l'oxygène de l'air prend une part prépondérante à l'oxydation du carbone.

Les matières azotées des débris végétaux et animaux existent principalement sous la forme de principes albuminoïdes et d'amides et subissent des modifications dont le résultat est la formation d'ammoniaque.

D'après les recherches de E. MARCHAL[3], ce processus est lié à une

1. *Jahresbericht der Chemie,* 1852, p. 783 ; *Économie rurale,* par BOUSSINGAULT, 2 volumes.

2. *Deutsche Vierteljahrsschrift für öffentliche Gesundheitspflege,* 1875, vol. VII, p. 205-237.

3. *Bulletin de l'Académie de Belgique,* 1893, série 3, t. XXV, p. 727 ; *Annales agronomiques,* t. XIX, n° 10, p. 506.

forte oxydation en ce sens que pour former cette ammoniaque il faut des quantités considérables d'oxygène qui fournissent autant d'acide carbonique.

L'oxygène attaque la matière azotée en transformant son carbone en acide carbonique, son soufre en acide sulfurique, et son hydrogène en eau, l'ammoniaque demeurant en quelque sorte comme le résidu.

L'ammoniaque est dans tous les cas le premier produit de décomposition qui se présente comme aliment pour la plante. — Pourtant elle ne demeure généralement pas à cet état ; elle s'oxyde en présence de l'air atmosphérique et se transforme d'abord en nitrite, puis en nitrate, selon les formules :

$$\underset{\text{Ammoniaque.}}{NH_3} + \underset{\text{Oxygène.}}{O_3} = \underset{\text{Acide nitreux.}}{HNO_2} + \underset{\text{Eau.}}{H_2O}$$

$$\underset{\text{Acide nitreux.}}{HNO_2} + \underset{\text{Oxygène.}}{O} = \underset{\text{Acide nitrique.}}{HNO_3}$$

Ces réactions qui constituent la *nitrification* se font très rapidement dans les sols perméables. Ce qui le montre c'est, d'une part, que, dans de telles conditions, le sol arable n'accuse que de faibles traces d'ammoniaque ; c'est, de l'autre, l'observation, faite par divers expérimentateurs, de la nitrification rapide dans le sol de l'ammoniaque des engrais. Par exemple, W. WOLF[1] a trouvé par hectare dans une couche de sol de $0^m,20$ d'épaisseur :

AZOTE.	GRAU-VACKE.	SCHISTE argileux.	GNEISS.	GNEISS.	DIABASE.	GRÈS rouge.
	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Azote nitrique. .	435,2	271,5	467,8	82,1	521,6	552,6
Azote ammoniacal.	19,2	26,2	27,3	6,3	89,4	27,9

Si l'on incorpore au sol un engrais ammoniacal tel que : fumier, purin, il survient très vite une oxydation énergique démontrée par

1. *Amtsblatt für die landw. Vereine im Königr. Sachsen,* 1872, p. 1 ; voir aussi : VON FODOR, *Hygienische Untersuchungen über Luft, Boden und Wasser,* 2e fasc., Braunschweig, 1882, p. 60.

ce fait que les eaux de drainage renferment de grandes quantités de nitrates.

Des observations de ce genre ont été faites par H. Marié-Davy[1], A. Lévy[2], Frankland[3], J.-B. Lawes, Gilbert et R. Warington[4].

Marié-Davy remplit un vase en verre de 2 mètres de hauteur avec un mélange de cailloux et de sable et il y versa chaque jour un litre d'eau d'égout. Les analyses de ce liquide et de l'eau qui s'écoulait du vase montrèrent nettement la transformation de l'ammoniaque en acide nitrique. Il trouva par litre dans :

	L'eau d'égout.	L'eau de drainage.
	milligr.	milligr.
Azote ammoniacal.	20,6	1,7
Azote nitrique	0,8	21,5

Les analyses faites par A. Lévy des eaux d'égout répandues sur le sol et des eaux de drainage s'écoulant de ce même sol sont aussi bien instructives sous ce rapport :

1882.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	MOYENNE.
Azote ammoniacal.									
Eau d'égout	17,4	20,7	21,0	28,7	29,1	32,6	21,1	»	24,4
Eau de drainage : Asnières . . .	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9
Eau de drainage : Cases	0,8	0,8	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8	0,9	0,9
Eau de drainage : Épinay	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8
Eau de drainage : Moulin de Cage .	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9

1. *Journal d'agriculture pratique,* 1882, t. I, n° 24, p. 817.

2. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris pour l'an 1884,* Paris, p. 408.

3. River Pollution Commission, *Reports of the commissioners appointed in 1868 to inquire into te best means of preventing the pollution of rivers.*

4. *Journal of the royal agricultural Society,* vol. XVII, XVIII et XIX.

1882.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	MOYENNE.
				Azote nitrique.					
Eau d'égout	1,4	0,9	1,6	0,8	1,1	0,4	»	»	0,9
Eau de drainage : Asnières. . . .	23,7	24,8	25,5	25,3	23,9	23,3	»	»	24,4
Eau de drainage : Cases.	27,9	18,4	22,9	29,6	32,5	31,3	»	»	27,1
Eau de drainage : Épinay	19,9	22,9	21,1	19,0	22,6	23,2	26,6	»	22,2
Eau de drainage : Moulin de Cage.	17,9	20,6	17,4	19,2	18,8	19,9	20,1	»	19,1

Ces chiffres montrent que l'azote apporté au sol sous forme d'ammoniaque s'oxyde presque entièrement en acide nitrique. Tandis que la solution primitive ne contient que de l'ammoniaque avec traces d'acide nitrique, c'est ce dernier qu'on rencontre presque exclusivement dans l'eau qui a filtré à travers le sol.

En conformité avec ces résultats, LAWES, GILBERT et WARINGTON ont montré que le sol agricole perd beaucoup d'azote par les eaux de drainage.

On n'est pas encore nettement fixé sur la question de savoir si dans la décomposition des matières animales ou végétales *à l'air libre,* il se dégage de l'azote, comme on l'a souvent admis. Divers essais ont été faits à ce sujet, mais dans des conditions qui affaiblissent l'action de l'oxygène et doivent donner lieu à des processus de décomposition forménique, c'est-à-dire à ces réactions qui se passent dans un milieu où l'accès de l'air est limité. Si l'on mélange, par exemple, les matières azotées en expérience avec une quantité d'eau telle que le tout forme une masse visqueuse, elles deviennent impénétrables à l'air. De même si l'on opère en vases clos, on ne se trouve plus dans les conditions normales. Quand bien même on y ferait pénétrer de l'air de temps en temps, le dispositif de l'expérience ne correspond pas aux conditions naturelles parmi lesquelles la ventilation, soit dans un sol perméable, soit dans une masse poreuse de fumier, a tant d'importance.

Les essais faits suivant ces méthodes par J. KÖNIG et J. KIE-

sow[1], par A. Morgen et J. König[2], par Dietzell[3] et par B. Gibson[4], ne sont dès lors pas concluants. La preuve que les matières soumises aux essais ne subissaient pas les processus d'oxydation est l'absence d'acide nitrique dans les produits finaux, tandis qu'on voit par ce qui précède qu'il se produit en abondance dès qu'il y a oxydation énergique. En outre, l'odeur pénétrante, désagréable, provenant sans doute d'acides gras, qui a été constatée dans presque toutes les expériences montre que ce sont les phénomènes de réduction qui ont prédominé.

L'emploi de la méthode dite par différence, c'est-à-dire par pesée pour la détermination du taux d'azote dans la matière traitée avant et après l'expérience ne permet pas d'ailleurs de dire nettement si, dans l'érémacausis, de l'azote se dégage à l'état libre; cette méthode montre seulement s'il y a moins d'azote, mais non si cet élément a disparu à l'état élémentaire ou sous forme de combinaison azotée (protoxyde ou bioxyde d'azote). Les essais faits dans cette voie n'ont pas donné de résultats concordants. Tandis que B. Tacke[5] trouve que la nitrification dans un air fréquemment renouvelé a pour conséquence une perte d'azote par dégagement d'azote gazeux, et que cette perte est liée à la production d'acide nitrique, les recherches d'Immendorff[6] montrent que ces pertes peuvent aussi se produire dans l'érémacausis avec aération suffisante sans qu'il y ait nitrification.

L'analyse des gaz inspire une bien plus grande confiance que la méthode par différence; elle seule montre si l'azote perdu par la matière l'a été à l'état élémentaire et permet de constater des quantités d'azote extrêmement faibles. Les expériences faites par A. Ehrenberg[7] d'après cette méthode ont prouvé que, soit dans la décom-

1. *Landw. Jahrbücher*, fasc. II, 1873, p. 107.
2. *Landw. Versuchsstationen*, fasc. XXX, 1884, p. 199-216.
3. *Zeitschrift des landw. Vereins in Bayern*, 1882, fasc. de mars.
4. *Sur le dégagement d'azote libre dans la putréfaction*, thèse, Baltimore, 1893 (en anglais).
5. *Landw. Jahrbücher*, fasc. XVIII, 1889, p. 439.
6. *Landw. Jahrbücher*, vol. XXI, 1892, p. 281.
7. *Zeitschrift für physiologische Chemie*, vol. XI, 1887, p. 145 et 438.

position directe des matières organiques, soit dans la transformation des sels ammoniacaux en nitrates, il ne se dégage pas d'azote libre quand l'oxygène est en quantité suffisante.

Par contre, IMMENDORFF[1] a trouvé que, dans la nitrification de l'ammoniaque soumise à une aération abondante, il peut y avoir perte d'azote à l'état d'azote gazeux. Quelques essais de B. TACKE[2] et de E. GODLEWSKI[3] ont confirmé les résultats d'IMMENDORFF. Comme lui GODLEWSKI trouve que la nitrification de l'ammoniaque donne lieu à un dégagement d'azote sous forme d'azote libre et non sous forme de protoxyde.

On voit que ces essais, faits d'après une méthode exacte, ne sont pas non plus concordants, ce qui tient surtout aux difficultés qu'on rencontre dans la conduite des expériences. Ces difficultés résident principalement en ce que l'on ne peut maintenir l'oxydation d'une façon continue et que, dans le cours des expériences, il y a des moments où la décomposition se fait suivant le mode forménique, lequel (on le verra plus loin) donne toujours lieu, dans certaines circonstances, à un dégagement d'azote libre. Du reste nous possédons actuellement trop peu d'observations pour considérer la question comme résolue. Sa solution ne sera possible que quand des recherches exactes auront précisé les conditions biologiques des microorganismes qui provoquent ces réactions et la composition chimique de tous les produits de l'eremacausis. Tant qu'elles n'auront pas eu lieu, *on devra considérer comme ouverte la question de savoir s'il se dégage ou non de l'azote libre dans la décomposition des matières azotées, soit directe, soit après nitrification préalable*[4].

Comme toutes les oxydations, la combustion lente (érémacausis) dégage une certaine chaleur, très variable suivant les conditions

1. *Loc. cit.*, p. 300.

2. *Loc. cit.*

3. *Anzeigen der Akademie der Wissenschaften in Krakau*, décembre 1892.

4. D'après des recherches récentes de BURRI et STUTZER (*Centralblatt fur Bakteriologie und Parasitenkunde*, vol. I, 1895, n°s 7 et 8, 9 et 10, 11 et 12), les nitrates doivent pouvoir être détruits sous forme d'azote libre par le concours de certains microorganismes, en présence de l'air; mais, comme on le verra ci-dessous à propos de la dénitrification, ce fait n'est pas encore prouvé.

extérieures. Les recherches de U. Gayon[1] montrent que l'élévation de température qui accompagne la décomposition n'a lieu qu'en présence de l'air. Il mit du fumier dans deux caisses d'un mètre cube dont l'une était percée de trous sur toutes les faces, l'autre ayant ses parois pleines. Voici les températures à diverses profondeurs.

	CAISSE AÉRÉE				CAISSE NON AÉRÉE			
	à 10 cent.	à 25 cent.	à 50 cent.	à 75 cent.	à 10 cent.	à 25 cent.	à 50 cent.	à 75 cent.
1er jour midi	12°,0	12°,0	12°,0	13°,0	15°,0	15°	15°	17°
— le soir . . .	16 ,5	21 ,0	25 ,0	27 ,0	20 ,0	19	18	20
2e jour midi.	59 ,0	68 ,0	64 ,0	52 ,0	15 ,0	22	18	18
— le soir	72 ,0	72 ,0	67 ,0	59 ,0	17 ,0	18	18	18
3e jour midi.	72 ,0	70 ,0	66 ,0	60 ,0	12 ,0	16	17	16
— le soir	72 ,0	69 ,5	66 ,0	59 ,0	12 ,0	15	16	15
4e jour midi.	68 ,0	66 ,0	62 ,0	55 ,0	12 ,0	14	15	14
— le soir	67 ,5	64 ,5	60 ,0	53 ,0	12 ,0	14	15	14
5e jour midi.	63 ,5	60 ,0	56 ,0	51 ,5	11 ,5	13	14	13
— le soir	62 ,0	58 ,0	55 ,0	50 ,0	11 ,5	14	13	13
6e jour midi.	58 ,0	53 ,0	47 ,0	44 ,0	11 ,5	12	13	12

La température de l'air pendant l'expérience a varié entre 8° et 10° centigrades.

Des chiffres qui précèdent il résulte nettement que l'échauffement remarquable du fumier est dû à l'oxydation puisqu'il ne se produit que dans la caisse aérée.

Remarquons aussi que la température de la masse décroît de l'extérieur à l'intérieur, ce qui tient à la diminution progressive de l'arrivée de l'air et, par suite, de la combustion. Le refroidissement progressif s'explique par le dessèchement de la masse, proportionnellement auquel décroît la décomposition. Si l'on humecte le fumier, la température s'élève.

1. *Journal de l'agriculture,* 1884, n° 781, p. 507; voir aussi Th. Schlœsing, *C. R.,* t. CVI, 1888, p. 1293.

La production de chaleur dépend en outre de la quantité des matières organiques, de leur aptitude à la décomposition et des facteurs extérieurs qui influent sur ce phénomène.

D'après les recherches de WAGNER[1], l'élévation de température dans la masse ou dans le sol additionnés de matières organiques est d'autant plus accusée qu'elles sont en tas plus volumineux, qu'elles sont plus aptes à la décomposition et que les conditions extérieures (température, humidité, accès de l'air) sont plus favorables.

A l'aide de monceaux de fumier, les jardiniers obtiennent sur leurs couches des élévations de température très importantes. La chaleur qui se dégage dans la fermentation de la poudre d'os doit être attribuée à ce que la matière organique s'y détruit très vite.

La chaleur ainsi produite par les engrais a-t-elle quelque action sur la fertilité? Les essais de WAGNER[2] ont montré que c'est seulement par l'emploi de grandes masses d'engrais (50 000 kilogr. à l'hectare) facilement décomposable et soumis à des circonstances favorables (temps chaud et humide) que l'on a pu observer une augmentation de température du sol. Encore n'était-elle pas très importante et ne s'élevait-elle qu'à 0,1° — 0,4° centigrades environ. Il suit de là — et de ce fait que dans la pratique on emploie de moindres quantités d'engrais dont certains (fumier de vache, engrais vert) sont rebelles à la décomposition et ne produisent qu'une augmentation de chaleur tout à fait minime — qu'en général la chaleur dégagée dans le sol par la destruction des matières organiques n'est pas suffisante pour avoir une influence notable sur la croissance des végétaux, d'autant plus que cette augmentation n'est que passagère, qu'elle va en diminuant progressivement et qu'elle est nulle pendant la saison froide où elle serait justement le plus utile. En horticulture et pour quelques végétaux cultivés en grand, on emploie de telles quantités d'engrais qu'elles procurent une élévation de température bien plus accusée et bien plus durable, pouvant hâter sensiblement la végétation.

---

1. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik,* publiés par WOLLNY, vol. V, 1882, p. 373-382.

2. *Loc. cit.,* p. 383-405.

2. — Décomposition forménique (putréfaction).

Quand l'air, ou plutôt son oxygène, n'arrive plus à la matière ou n'y arrive qu'au-dessous de certaines limites, le mode de décomposition est tout autre que dans le cas précédent. *Il se forme alors beaucoup moins de produits gazeux qui sont principalement de l'acide carbonique, du formène, de l'hydrogène, de l'hydrogène sulfuré, de l'hydrogène phosphoré, du protoxyde d'azote, de l'azote, et la matière organique constitue une masse de teinte plus ou moins foncée, désormais très rebelle à la décomposition, qui, outre ses principes propres non azotés, renferme diverses combinaisons azotées* (*leucine, tyrosine, indol, scatol, amines primaires, acides amidés, etc.*), *de l'ammoniaque, quelquefois des nitrites, et, en outre, des acides gras volatils* (*acides formique, butyrique, acétique, propionique, valérianique*). *La plus grande partie des principes minéraux s'y trouve sous une forme inassimilable.* En général, le dégagement d'ammoniaque y est faible et la destruction des matières protéiques n'aboutit qu'à des combinaisons organiques très complexes.

Les processus chimiques de la putréfaction n'ont été que peu étudiés en général. Les résultats obtenus jusqu'ici sont d'autant moins à négliger qu'ils donnent une image au moins approchée des réactions, comme nous allons l'exposer.

L'acide carbonique qu'on rencontre sans exception dans les produits de la putréfaction se dégage d'une façon incomparablement plus lente que dans l'eremacausis, faute d'une quantité suffisante d'oxygène. Cela résulte clairement de la diminution considérable constatée dans le dégagement de l'acide carbonique d'un sol dès que celui-ci est gorgé d'eau et se trouve par suite privé du libre accès de l'air. L'oxygène nécessaire à l'oxydation du carbone dans la putréfaction provient d'abord des matières organiques elles-mêmes, mais aussi des éléments réductibles qu'elles contiennent, notamment des nitrates, nitrites, du protoxyde d'azote et des sels de fer et de manganèse au maximum. Les matières organiques soustraient énergiquement à ces diverses combinaisons leur oxygène,

parfois en totalité. Aussi le processus dont il est question peut-il être caractérisé comme un processus de réduction à l'inverse de l'érémacausis où dominent les phénomènes d'oxydation. On doit conclure de ce qui précède que la quantité d'éléments réductibles sera en rapport avec le dégagement d'acide carbonique. C'est ce qui arrive du moins pour les sels de fer et de manganèse comme le montre l'expérience suivante.

2 grammes de fumier de cheval en poudre furent intimement mélangés à 400 grammes de sable quartzeux et humectés soit de 50 grammes d'eau, soit d'une même quantité d'une solution à 1/2 p. 100 de sulfate de fer et de manganèse. Le mélange était plongé dans une atmosphère d'hydrogène.

Les quantités d'acide carbonique trouvées dans 1 000 volumes de gaz (à 0° et à la pression de 760 millimètres) furent (moyenne de 8 observations) :

Avec l'eau	4,376
— le sulfate de manganèse.	5,252
— le sulfate de fer.	5,698

Ces sels avaient donc, en se réduisant, activé l'oxydation du carbone. Cette réduction peut aller assez loin pour qu'il se forme des pyrites (FeS_2), d'après les recherches de M. Märcker[1], par exemple dans les sols de tourbe.

Comme conséquence de cette oxydation extrêmement lente, le dégagement de chaleur dans la décomposition forménique est minime et ne peut être mis en évidence, dans les conditions de la nature, par les instruments de mesure habituels.

Une partie du carbone se transforme en formène (CH_4) et la masse reste alcaline à cause d'un certain taux de carbonate d'ammoniaque. D'après F. Hoppe-Seyler[2], la cellulose, sous l'action d'un schizo-mycète largement répandu dans la vase, se transforme

---

1. *Zeitschrift des landw. Vereins für die Provinz Sachsen,* 1874, n°s 2 et 3, p. 70.

2. *Archiv der gesammten Physiologie,* vol. XII, p. 1 ; *Zeitschrift für physiologische Chemie,* vol. X, p. 422.

directement sous l'eau en acide carbonique et formène, suivant l'équation :

$$\underset{\text{Cellulose}}{C_6H_{10}O_5} + \underset{\text{Eau}}{H_2O} = \underset{\text{Acide carbonique}}{3CO_2} + \underset{\text{Formène.}}{3CH_4}$$

Suivant P. P. DEHÉRAIN[1] cette réaction ne semble se produire que quand on introduit de temps en temps de l'oxygène dans la masse en décomposition. Avec absence prolongée de ce gaz le dégagement forménique cesse et il ne reprend qu'après l'addition de certaines quantités d'oxygène[2].

Outre les fermentations précédentes, il s'en présente encore parfois une autre où, au lieu de formène, c'est de l'hydrogène qui se dégage. Dans la décomposition du formiate de chaux F. HOPPE-SEYLER[3] en a montré un exemple. Place-t-on ce sel sous l'eau avec un peu de limon d'égout, il se décomposera en donnant de l'acide carbonique et de l'hydrogène avec un résidu de carbonate de chaux.

Cette réaction peut se représenter ainsi :

$$\underset{\text{Formiate de chaux.}}{CaC_2H_2O_4} + \underset{\text{Eau.}}{H_2O} = \underset{\text{Carbonate de chaux.}}{CaCO_3} + \underset{\text{Acide carbonique.}}{CO_2} + \underset{\text{Hydrogène.}}{4H}$$

La réaction acide de la masse mise en évidence par l'apparition simultanée d'acides gras volatils, notamment d'acide butyrique (DEHÉRAIN)[4] est caractéristique de ce processus. La présence de cet acide se reconnaît aisément à la formation d'éther butyrique ainsi qu'à son odeur propre. Jusqu'alors on ne sait pas si, pour ce dégagement d'hydrogène comme pour celui de formène, il est nécessaire que l'oxygène ait accès de temps en temps ou si ce processus repré-

1. *C. R.*, t. XCVIII, 1884, n° 6 ; t. XCIX, n° 1 ; *Journal de l'agriculture*, 1884, n° 781 ; *Annales agronomiques*, t. X, n° 9.

2. Voyez HOPPE-SEYLER, *Zeitschrift für physiologische Chemie*, vol. VIII, p. 214.

3. *Loc. cit.*, vol. X, p. 422.

4. *Annales agronomiques*, t. X, n° 1, p. 1.

sente cette forme de décomposition à laquelle conduit l'absence complète d'oxygène.

La putréfaction des matières protéiques[1] se fait sans doute conformément à la décomposition de la molécule d'albumine qui donne lieu à des dérivés amidés de la série grasse (acides amidés), à un corps azoté de la série aromatique et à un résidu de matières peptoniques et autres encore inconnues.

Les produits d'altération qui se forment tout d'abord et qui sont précisément ces mêmes combinaisons (amidées) existant primitivement dans les matières organiques non décomposées, se transforment ensuite en partie, par exemple, les acides amidés en ammoniaque et acides gras, ceux-ci se détruisant après par la mise en liberté d'acide carbonique, hydrogène et formène. C'est ainsi que pour la leucine on a établi qu'elle subissait une fermentation où prenaient naissance de l'acide valérianique, de l'ammoniaque, de l'acide carbonique et de l'hydrogène. Le glycocolle et d'autres acides amidés subissent peut-être une décomposition analogue. Dans la fermentation de la tyrosine, il se forme, d'après NENCKI, de l'indol, de l'acide carbonique, de l'eau et de l'hydrogène.

La décomposition des matières azotées est plus ou moins rapide suivant les circonstances extérieures; une assez grande partie ne se transforme sûrement que jusqu'à un certain degré; c'est ce qu'on doit conclure de ce fait que les matières soumises à la putréfaction s'accumulent sur leur lieu de formation et renferment de grandes quantités d'azote organique. L'ammoniaque formée n'apparaît d'ordinaire qu'en minime quantité et semble par là subir des décompositions ultérieures.

Enfin, il est important pour l'agriculture que, parmi les produits de la putréfaction, on ait signalé l'azote gazeux et les degrés inférieurs d'oxydation de l'azote (nitrite, protoxyde d'azote).

La réduction des nitrates, voire des nitrites, nommée *dénitrification*, a été étudiée à fond. Th. SCHLŒSING avait déjà trouvé dans ses premières expériences que l'acide nitrique disparaissait du sol dès que l'air y était remplacé par l'azote. Plus tard, U. GAYON et

1. G. FLÜGGE, *Die Mikroorganismen*, Leipzig, 1886, p. 493.

G. Dupetit[1] et aussi P. P. Dehérain et L. Maquenne[2] ont étudié expérimentalement ces réactions. Les premiers ayant mélangé de l'urine putréfiée à de l'eau d'un canal à laquelle ils avaient ajouté 0gr,02 de nitrate de potasse par litre, virent le nitrate disparaître peu à peu. Toute une série d'essais montra la possibilité de réduire 0gr,1 et même 0gr,2 de nitrate par litre. Au delà de ces limites l'eau du canal était insuffisante ; mais, si on la remplaçait par du bouillon de poule neutralisé avec une solution de potasse, on pouvait réduire complètement des solutions de nitrate à 5 p. 100.

Il se dégagea de l'azote pur qui formait une grande partie de l'azote des nitrates ; le reste donna de l'ammoniaque et peut-être des dérivés amidés de la matière organique employée. L'oxygène du nitrate forma de l'acide carbonique restant dans la solution sous forme de carbonate ou de bicarbonate. Les nitrates de soude, d'ammoniaque et de chaux offrirent les mêmes réactions que le nitrate de potasse. D'autres recherches des mêmes auteurs ont montré que, dans certaines circonstances, la réduction des nitrates ne va que jusqu'à la formation de nitrites.

Les essais de Dehérain et Maquenne sont en quelque sorte un complément des précédents. Ils prirent deux sols, un riche en matière organique et naturellement salpêtré, l'autre pauvre en matière organique et dépourvu de nitrates.

300 grammes furent placés avec des quantités variables de nitrates dans des flacons de 250 centimètres cubes hermétiquement bouchés et munis de tubes abducteurs ouvrant sous le mercure. La terre riche en matières organiques accusa, dans la pression intérieure, une diminution qui fut suivie d'un dégagement de gaz (acide carbonique et azote). Dans la terre pauvre, la diminution de pression à l'intérieur persista et ne fut suivie d'aucun dégagement gazeux. En conséquence, les nitrates peuvent exister dans les sols ordinaires en l'absence de l'air sans dégager de l'azote. Celui-ci n'apparaît qu'autant que la quantité de matières organiques augmente ; alors on obtient bientôt de l'azote gazeux.

1. *C. R.*, t. XCV, p. 644 et 1365.
2. *C. R.*, t. XCV, p. 691.

Après avoir élucidé le fait au point de vue qualitatif, les expérimentateurs, dans une seconde série d'essais, mesurèrent et étudièrent de plus près les gaz dégagés pendant la réduction des nitrates. Dans des tubes munis de robinets en verre tenant le vide, ils placèrent 30 grammes de terre additionnée ou non de nitrates et de matières organiques. Au début de l'expérience, on mesura les gaz à deux reprises différentes en faisant chaque fois le vide à la trompe.

Après 35 jours, on recueillit les gaz. Au lieu de l'oxygène et de l'azote que renfermaient les tubes tout d'abord, on trouva, à la fin de l'expérience, dans trois tubes remplis de divers mélanges, des proportions variables d'acide carbonique, pas d'azote et un résidu gazeux indiquant qu'il y avait eu dégagement de gaz. La proportion de gaz dégagée était plus influencée par l'abondance de la matière organique que par celle du salpêtre ; mais même quand la matière organique a été très abondante, on n'a jamais obtenu une quantité de gaz correspondant à celle qui existait dans le nitrate.

On rechercha ensuite par la méthode eudiométrique si le gaz restant après l'absorption de l'acide carbonique ne renfermait pas de gaz combustible et, dans les trois tubes, les gaz provenant de la réduction des nitrates du sol accusèrent un taux remarquable de protoxyde d'azote.

Des déterminations exactes en montrèrent 11.75 p. 100 dans un flacon qui contenait 300 grammes de terre de jardin et 9.35 p. 100 dans un flacon renfermant 300 grammes de terre et 10 grammes de salpêtre.

Quand les quantités de salpêtre et de matière organique sont convenables, la réduction des nitrates a lieu avec dégagement de protoxyde d'azote et d'azote gazeux. Les conditions dans lesquelles le gaz hilarant prend naissance sont assez particulières ; car non seulement il est arrivé assez souvent aux expérimentateurs de ne pas le rencontrer dans les gaz provenant de la réduction des nitrates ; mais, de plus, Schlœsing, qui avait prévu la possibilité du dégagement des oxydes inférieurs de l'azote pendant la réduction des nitrates dans la terre arable n'avait pu déceler leur présence dans ses travaux de 1873.

Le dégagement d'azote gazeux dans la décomposition forménique n'a pas été seulement trouvé dans les essais précédents faits en l'absence complète de l'air ; mais il avait déjà été établi par des recherches antérieures où l'air n'était fourni à la masse en décomposition qu'au-dessous de certaines limites. Ainsi J. König et J. Kiesow[1] dans la putréfaction de la poudre d'os, de la viande et du fumier de vache, B. E. Dietzell[2] dans celle du sang desséché, et A. Morgen et J. König[3] dans celle du sang, de la poudre d'os, de cuir et de corne ont trouvé qu'une plus ou moins grande portion de l'azote se dégageait à l'état libre ou, en tout cas, sous une forme telle que cet azote doit être considéré comme provisoirement perdu pour l'agriculture.

On n'est pas d'accord sur les causes de cette perte d'azote. Il faudrait avant tout savoir si l'azote gazeux se dégage directement de la matière organique ou bien de l'ammoniaque qui se produit en faible quantité, ou s'il est un produit de la dénitrification.

Morgen et König admettent que la perte d'azote est due en première ligne à l'oxydation ; l'ammoniaque naissante serait brûlée par l'oxygène et il se formerait de l'eau et de l'azote suivant l'équation :

$$\underset{\text{Ammoniaque.}}{2NH_3} + \underset{\text{Oxygène.}}{O_3} = \underset{\text{Eau.}}{3H_2O} + \underset{\text{Azote.}}{N_2}$$

Cette conception ne semble cependant pas admissible, car la quantité d'oxygène disponible dans une masse soustraite à l'action de l'air serait complètement insuffisante pour l'oxydation de l'ammoniaque, étant donné que l'oxygène, comme on l'a vu, est tout d'abord réclamé par le carbone de la matière organique.

Quant à la question de savoir si l'azote libre se dégage directement des éléments azotés, d'après divers essais concordants, elle doit être résolue par la négative.

B. Tacke[4] a trouvé que, dans la décomposition de matières orga-

---

1. *Landw. Jahrbücher,* vol. II, 1873, p. 107.
2. *Zeitschrift des landw. Vereins in Bayern,* 1882, fasc. de mars.
3. *Landw. Versuchsstationen,* vol. XXX, 1884, p. 199-216.
4. *Landw. Jahrbücher,* vol. XVI, p. 917-937.

niques azotées, mais sans nitrates, en l'absence d'oxygène, il ne se dégageait pas d'azote. Même résultat fut obtenu par Th. SCHLŒSING[1] qui employa pour ses expériences de la viande de bœuf, des fèves broyées, du fromage de Roquefort, des filets de sole, du fumier de cheval mêlé d'urine et une culture d'*Aspergillus niger* en solution nutritive. La perte d'azote gazeux fut, dans tous ces cas, si faible, qu'elle doit être considérée comme absolument insignifiante. A. EHRENBERG[2] soumit des matières organiques azotées (fumier de cheval) peu humides à la décomposition en l'absence d'oxygène et ne put déceler dans les gaz qui se dégagèrent que l'acide carbonique et le formène. O. KELLNER et T. YOSHII[3] se sont aussi occupés de cette question. Ils mirent à décomposer diverses substances, fèves de Soja finement moulues, farine de poisson et lait avec de l'urine putréfiée (les deux premières matières étaient mélangées d'eau) et les placèrent dans des flacons bouchés. Quelques-unes de ces matières étaient pourvues de petites quantités de gypse destiné à fixer l'ammoniaque. Dans aucun des huit cas on ne put observer une perte quelconque d'azote, bien que la putréfaction ait été poussée très loin. Il n'y eut jamais de nitrification.

On doit conclure de tous ces résultats concordants que, *dans la décomposition forménique des matières organiques, il n'y a pas de dégagement* **direct** *d'azote gazeux.*

Ce processus ne se montre que dans la désoxydation des nitrates et nitrites, comme le prouvent non seulement les expériences relatées ci-dessus, mais encore celles de A. EHRENBERG, O. KELLNER et T. YOSHII.

Le premier a trouvé que, dans des mélanges organiques en putréfaction par manque d'oxygène, il y avait décomposition des nitrates grâce à laquelle une portion de leur azote s'était dégagée à l'état gazeux et qu'il se formait du gaz des marais aussitôt après leur décomposition. 300 grammes de fumier de cheval et 500 grammes de fumier de vache furent humectés avec une solution renfer-

---

1. *C. R.*, t. CVIII, p. 205 et 261.
2. *Zeitschrift für physiologische Chemie,* vol. XI, 1887, p. 438-471.
3. *Zeitschrift für physiologische Chemie.* vol. XII, p. 95.

mant 5 grammes de salpêtre dans 100 centimètres cubes d'urine et placés dans un ballon rempli d'acide carbonique.

L'analyse des gaz, faite de temps en temps, donna les résultats suivants :

GAZ RECUEILLI au bout de	FUMIER DE CHEVAL.			FUMIER DE VACHE.		
—	Acide carbonique.	Azote.	Formène.	Acide carbonique.	Azote.	Formène.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
10 jours. . .	46.21	53.79	»	74.94	25.06	»
20 — . . .	69.53	30.47	»	53.18	46.82	»
30 — . . .	73.43	23.72	2.85	47.64	49.04	3.34
60 — . . .	44.09	»	55.91	45.81	»	54.19

KELLNER et YOSHII ajoutèrent à une dilution d'urine humaine en putréfaction de la terre provenant de la couche superficielle du sol pour introduire le ferment nitrique. Dans ce mélange, où la nitrification se produisit avec une grande intensité, il y eut ensuite un fort dégagement d'azote qui, au bout de 6 mois, atteignit 9.6 p. 100 et, au bout de 8 mois, 10.1 p. 100.

Ces expériences établissent donc que, *dans les mélanges en putréfaction, l'azote se dégage à l'état gazeux seulement en présence des nitrates.*

Les processus aboutissant au dégagement de l'azote sont divers et varient vraisemblablement suivant qu'il se produit du formène ou de l'hydrogène. (Voir les expériences précédentes de HOPPE-SEYLER, p. 13.)

Dans le premier cas c'est probablement l'action sur les combinaisons amidées de l'acide nitreux libre se dégageant du milieu qui donne lieu à la formation d'azote libre (DIETZELL [1]). C'est ainsi que la leucine en présence de l'acide nitreux se transforme en acide leucique avec formation d'eau, tandis que l'azote se dégage molécule pour molécule. Cette décomposition est si rapide qu'elle est utilisée pour la détermination de l'azote de la leucine [2]. En faisant réagir l'acide nitreux sur les amines primaires, l'azote est mis en

1. D'après les recherches de MÜNTZ, *C. R.*, t. CXII, p. 1142-1146, l'acide carbonique peut mettre en liberté l'acide nitreux en formant un carbonate.

2. R. SACHSSE, *Landw. Versuchsstationen*, vol. XVII, p. 327.

liberté[1] et, d'après E. Kern[2] et E. Schulze[3], les sels ammoniacaux sont détruits en partie, même à froid, par l'acide nitreux avec dégagement d'azote. Les amines primaires provoqueront aussi une élimination d'azote en chassant l'ammoniaque du nitrite d'ammonium.

Dans le second cas, la formation de l'azote élémentaire se comprend aisément si l'on considère que l'hydrogène à l'état naissant a une grande action réductrice et peut dès lors réduire les nitrates et nitrites en donnant de l'eau, des combinaisons moins oxygénées et de l'azote libre. Quand tout l'acide nitrique libre est détruit, il se forme de l'hydrogène.

Les modifications subies par les matières organiques dans leur composition élémentaire et dans leur taux de principes minéraux quand elles sont privées d'air n'ont encore été que peu étudiées; pourtant, grâce à quelques analyses élémentaires, notamment à celles de W. Detmer[4] sur de la tourbe de divers âges, nous pouvons nous en faire une idée approchée. Pour voir l'influence qu'exerce sur la composition de l'humus la durée de la décomposition, Detmer fit trois analyses de la tourbe de Jessbecker : I, sur de la tourbe brune de la surface; II, sur de la tourbe noire prise à $2^m,2$; III, sur de la tourbe noire prise à $4^m,4$.

Dans la tourbe I, les débris organiques étaient encore aisément reconnaissables; dans II et III, ils étaient transformés en une masse homogène. Les échantillons desséchés à 120° centigrades renfermaient (cendres non comprises) :

	I.	II.	III.
Carbone	57,75	62,02	64,07
Hydrogène	5,43	5,21	5,01
Oxygène	36,02	30,67	26,87
Azote	0,80	2,10	4,05
Cendres	2,72	7,42	9,16

1. A. W. Hofmann, *Ann. d. Chemie und Pharmacie*, vol. LXXV, p. 363; V. Meyer et F. Forster, *Ber. d. deutschen chem. Ges.*, vol. IX, p. 536; V. Meyer, J. Barbieri et F. Forster, *id.*, vol. X, p. 130.

2. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XXIV, p. 368.

3. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XXV, p. 173, et vol. XXVI, p. 260.

4. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XIV, p. 248.

Par les progrès de la décomposition la matière organique s'enrichit donc en azote et en carbone, parce que les éléments azotés se décomposent plus lentement que les non azotés et parce que l'hydrogène et l'oxygène se séparent de la masse en plus forte proportion que le carbone. Les matières minérales, si elles ne sont pas lavées, restent telles quelles, mais leur taux relatif augmente par la diminution de la matière organique.

De ce qui précède il résulte déjà qu'érémacausis et putréfaction sont deux processus de décomposition essentiellement différents et que l'on ne doit pas confondre comme on le fait encore souvent. La différence consiste surtout en ce que la matière organique se volatilise presque complètement dans le premier cas, tandis que, dans l'autre, la formation de produits gazeux est limitée et il reste un abondant résidu. A cet égard, l'érémacausis est caractérisée par la **disparition** et la putréfaction par l'**accumulation** des détritus.

3. — Autres modes de décomposition.

Divers modes de décomposition, s'écartant à première vue de ceux qui viennent d'être décrits, rentrent après un examen attentif soit dans l'un, soit dans l'autre des processus étudiés ou bien, suivant les cas, circonstances extérieures, etc., se placent entre les deux. C'est le cas, par exemple, pour la pourriture qu'éprouvent dans un milieu aéré les matières pauvres en azote et suffisamment humides. Érémacausis et putréfaction peuvent se présenter simultanément dans la même masse, suivant que les diverses couches reçoivent de plus ou moins grandes quantités d'air (fumier d'étable).

Dans ces autres modes de décomposition devrait tout d'abord rentrer la fermentation alcoolique depuis que les recherches de A. MÜNTZ[1] ont montré que l'alcool se rencontrait dans les terres de jardin et dans les sols riches en matières organiques en assez grande proportion pour qu'on puisse l'extraire et le caractériser d'après ses

1. *C. R.*, t. XCII, p. 499.

propriétés essentielles. On n'a pas établi jusqu'alors si cette réaction se présente d'une manière générale dans la nature [1].

L'alcool (éthylique), joint à l'acide carbonique et divers autres produits en moindres quantités (huile empyreumatique, acide butyrique, succinique, glycérine, etc.), se dégage de diverses espèces de sucre (dextrose, lévulose et maltose) soit directement, soit après inversion (sucre de canne, sucre de lait) suivant les équations :

$$C_6H_{12}O_6 = 2C_2H_6O + 2CO_2$$

Sucre de raisin.	Alcool.	Acide carbonique.

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O = 4C_2H_6O + 4CO_2$$

Sucre de canne.	Eau.	Alcool.	Acide carbonique.

La fermentation ammoniacale de l'urine est plus importante pour l'agriculture. On sait que l'urine normale de l'homme et des mammifères domestiques prend, quand elle séjourne à l'air, une odeur ammoniacale.

Cela tient à ce que l'urine se transforme par addition d'eau en carbonate d'ammoniaque suivant la réaction :

$$CH_4N_2O + 2H_2O = 2(NH_3)CO_3$$

Urine.	Eau.	Carbonate d'ammoniaque.

L'acide hippurique, qui existe en grande quantité, avec l'urée, dans l'urine des herbivores, se dédouble aussi, par addition d'eau, d'abord en acide benzoïque et en glycocolle. L'équation suivante rend compte de la réaction.

$$C_9H_9NO_3 + H_2O = C_2H_5NO_2 + C_7O_6O_2$$

Acide hippurique.	Eau.	Glycocolle.	Acide benzoïque.

Le glycocolle considéré, d'après sa constitution, comme acide

1. L'alcool provient des bactéries. Un assez grand nombre de bactéries du sol donnent des quantités notables d'alcool éthylique aux dépens d'hydrocarbones solubles. (Trad.).

amino-éthanoïque = $CH^2 (AzH^2) COOH$, subit sans doute des changements ultérieurs d'où résultent finalement des sels ammoniacaux. L'acide urique, qui existe abondamment dans les excréments des oiseaux, donne aussi finalement, comme l'acide hippurique, du carbonate d'ammoniaque. Cette transformation a lieu par l'oxydation complète qui dédouble l'acide urique en acide carbonique et urée.

La formation de l'ammoniaque se produit très rapidement dans l'urée, plus lentement dans l'acide urique et c'est l'acide hippurique qui se montre le plus résistant.

L'oxydation de maintes matières organiques azotées ou non aboutit à la production d'acides gras volatils.

L'acide formique (CH_2O_2) est un produit de décomposition et d'oxydation des matières albuminoïdes et de certains hydrates de carbone végétaux ou animaux ; il se forme aussi par oxydation de l'alcool méthylique, tout comme l'acide acétique dérive de l'alcool éthylique.

L'acide acétique ou éthanoïque doit être compté parmi les produits de décomposition des matières organiques et c'est à ce titre qu'il existe, quoique en faible quantité, dans la tourbe, l'humus et autres substances en voie d'altération. Il se forme très facilement par oxydation de l'alcool d'après la réaction suivante :

$$\underset{\text{Alcool.}}{C_2H_6O} + \underset{\text{Oxygène.}}{2O} = \underset{\text{Acide acétique.}}{C_2H_4O_2} + \underset{\text{Eau.}}{H_2O}$$

L'acide propionique ($C_3H_6O_2$) se produit avec d'autres acides gras dans la décomposition de beaucoup de matières végétales, particulièrement de celles qui sont riches en albuminoïdes et en tannins.

L'acide butyrique paraît être, comme les autres acides gras volatils, un produit d'altération de certaines substances végétales. Il se forme dans la fermentation du sucre par dégagement d'acide carbonique et d'hydrogène suivant l'équation :

$$\underset{\text{Sucre.}}{C_6H_{12}O_6} = \underset{\text{Acide carbonique.}}{2CO_2} + \underset{\text{Acide butyrique.}}{C_4H_8O_2} + \underset{\text{Hydrogène.}}{4H}$$

D'autres hydrates de carbone tels que : l'amidon, l'inuline, la dextrine, la dextrose, etc., se transforment d'abord en acide lactique qui se dédouble ensuite, à mesure que la fermentation progresse, en acide butyrique, acide carbonique et hydrogène d'après l'équation :

$$2C_3H_6O_3 = 2CO_2 + C_4H_8O_2 + 4H$$

Acide lactique.	Acide carbonique.	Acide butyrique.	Hydrogène.

L'acide valérianique ($C_5H_{10}O_2$) est un produit de décomposition des corps albuminoïdes et des albuminates ; il en est de même de l'acide caproïque ($C_6H_{12}O_2$).

Parmi les acides organiques importants il faut distinguer les acides lactique et succinique. Ce sont surtout les sucres de canne, de raisin, de lait, la mannite, la sorbite, l'inosite, etc., qui contribuent à la formation du premier. La réaction se représente ordinairement par l'équation :

$$C_6H_{12}O_6 = 2C_3H_6O_3$$

Sucre.	Acide lactique.

qui ne semble cependant pas exacte, parce qu'on n'y tient pas compte de l'acide carbonique qui se dégage en même temps.

L'acide succinique ($C_4H_6O_4$) se produit dans la décomposition de la sève des plantes qui contiennent de l'asparagine et en faible quantité dans la fermentation de l'alcool.

Les acides gras et les acides organiques végétaux subissent des fermentations diverses qui s'accomplissent au mieux quand ces acides se trouvent dans le substratum sous forme de sels neutres, surtout de sels de chaux[1].

Le formiate de chaux donne du carbonate de chaux, de l'acide carbonique et de l'hydrogène.

L'acétate de chaux se décompose en carbonate de chaux, acide carbonique et formène.

1. C. Flügge, *Die Mikroorganismen*, Leipzig, 1886, p. 489.

Le lactate de chaux subit, d'après Fitz, quatre fermentations différentes :

1° La fermentation en acide propionique avec lequel on rencontre, comme sous-produits, l'acide acétique, l'aide succinique et l'alcool ;

2° Une fermentation dans laquelle il se forme, avec de l'acide propionique, d'assez grandes quantités d'acide valérianique;

3° La fermentation butyrique dans laquelle naissent, comme sous-produits, à côté du butyrate et du carbonate de chaux, des alcools éthylique et butylique ;

4° Une fermentation à laquelle est liée la formation des acides butyrique et propionique.

Le glycérate de chaux donne, dans un cas, de l'acétate de chaux et de faibles quantités d'acide succinique et d'alcool éthylique ; dans un autre, de l'acide formique et, comme sous-produits, de l'alcool méthylique et de l'acide acétique.

Le malate de chaux fournit surtout de l'acide succinique avec un peu d'acide acétique et propionique. Mais il peut aussi subir la fermentation butyrique avec dégagement d'hydrogène ou lactique avec dégagement d'acide carbonique.

Le tartrate de chaux donne, par la fermentation, de l'acide propionique ou butyrique et aussi, dans certaines circonstances, de l'acide acétique.

Le citrate de chaux fournit, d'après Fitz, de l'acide acétique en abondance, avec de l'alcool éthylique et de l'acide succinique.

L'oxalate de chaux se transforme par la fermentation en carbonate de chaux.

Les autres fermentations de matières organiques n'offrent pas d'intérêt à notre point de vue et peuvent d'autant mieux être passées sous silence qu'elles ont jusqu'alors été peu étudiées. Par contre, il y a encore à signaler, sous le rapport agronomique, deux modes importants de décomposition dans lesquels se séparent des corps inorganiques, notamment du soufre et de l'oxyde de fer.

D'après S. Winogradsky[1], il se sépare du soufre par l'oxydation de l'hydrogène sulfuré qui se forme lorsque le carbure d'hydrogène,

1. *Botanische Zeitung* 1887, n°s 31-37.

tel qu'il s'en dégage dans la putréfaction, réduit, à l'état naissant, les sulfates, surtout ceux de soude et de chaux (gypse), suivant la réaction :

$$CH_4 + CaSO_4 = CaCO_3 + H_2S + H_2O$$

Carbure d'hydrogène.	Sulfate de chaux.	Carbonate de chaux.	Hydrogène sulfuré.	Eau.

La production du sesquioxyde de fer dérive de l'oxydation du carbonate de protoxyde de fer. Cette réaction est la cause des dépôts connus sous le nom de limonite, fer des marais, etc.

CHAPITRE II

ACTION DES MICROORGANISMES

On croyait généralement, il y a trente ans, que les phénomènes de décomposition des matières organiques étaient d'ordre purement chimique ; diverses recherches récentes ont montré qu'ils sont d'ordre biologique, attendu qu'ils n'ont lieu qu'avec l'aide de microorganismes.

Cette démonstration peut se faire de deux manières : soit en chauffant les substances en décomposition ou en leur ajoutant des antiseptiques appropriés et en voyant si la décomposition cesse, soit en isolant les divers microorganismes qui pullulent dans les matières en décomposition ou en putréfaction et en étudiant les réactions qu'ils peuvent exercer sur les différents éléments des débris animaux ou végétaux. En suivant ces deux voies on a cherché à pénétrer plus intimement dans les faits et, malgré les lacunes des recherches entreprises jusqu'ici, on a obtenu d'ores et déjà des résultats qui fournissent des points d'appui solides et permettent des applications pratiques.

J'ai fait, d'après la première méthode, une série d'essais dans lesquels les matières soumises à l'érémacausis ont été additionnées de divers antiseptiques ou soumises à des températures assez élevées. J'y ai déterminé les quantités d'acide carbonique qui se dégageaient, toutes autres circonstances égales ; elles pouvaient servir de mesure à l'intensité de la décomposition. Voici le mode opératoire que j'ai employé :

Les sols riches en humus ou les mélanges de sols, imprégnés d'égales quantités de solution, furent placés dans des tubes de verre en U de 3^{cm},5 de diamètre et d'environ 700 centimètres cubes de capacité, dont chaque extrémité était fermée par un bouchon en caout-

chouc traversé par un tube en verre courbé à angle droit. Les tubes contenant les sols étaient rangés verticalement les uns à côté des autres dans une caisse en zinc remplie jusqu'au bord d'eau constamment maintenue à 30° à l'aide du thermostat Soxhlet. Des deux tubes de dégagement, l'un fut relié par un tuyau de caoutchouc avec un flacon rempli jusqu'au quart d'acide sulfurique concentré, l'autre fut relié de la même manière avec plusieurs autres tubes remplis de chaux sodée. Entre le flacon d'acide sulfurique et l'aspirateur destiné à extraire l'air des tubes, on plaça un tube d'absorption de PETTENKOFER rempli d'une solution de baryte. Entre les prises d'essai faites d'ordinaire à intervalles égaux (de 24 à 48 heures), les tubes restèrent nuit et jour dans la caisse de zinc à la même température et, pour empêcher l'arrivée de l'acide carbonique, furent fermés hermétiquement à l'aide de petites baguettes de verre placées dans les caoutchoucs des tubes de dégagement après qu'on avait enlevé les récipients à chaux sodée et à acide sulfurique.

Ce dispositif offrait cet avantage que tous les facteurs de la décomposition des matières organiques, tels que température, humidité, constitution du sol, etc., restaient constants pendant toute la durée d'une expérience.

Pour enlever l'air des tubes de dégagement, au début de chaque prise d'essai, on pompait un demi-litre d'air, puis on plaçait le tube à absorption avec baryte et on extrayait l'air du sol durant une heure et demie ou deux heures dans la proportion de deux litres en bulles de la grosseur d'une lentille.

Quand l'air avait passé en quantité suffisante dans la solution de baryte, on enlevait la communication avec l'aspirateur et le flacon d'acide sulfurique et on versait la solution barytique dans un petit flacon de 250 centimètres cubes, bien fermé, qu'on gardait dans un lieu tranquille et frais jusqu'à ce que le carbonate de baryte se fût complètement déposé. On prenait alors, à l'aide d'une pipette, 30 centimètres cubes du liquide clair et on titrait.

Pour les essais relatifs à l'influence de la température, on prit deux échantillons de 16gr,3 représentant la moyenne d'une assez grande quantité de fumier de cheval finement pulvérisé; on les humecta dans une capsule en porcelaine avec 34gr,7 d'eau distillée. L'un des

échantillons fut placé dans un tube de verre en U, l'autre dans un tube de fer de même forme qui, à ses deux extrémités, était muni de deux robinets solidement vissés et fut plongé pendant six heures dans un bain d'huile à 115° centigrades. Puis les deux tubes furent portés dans le bain-marie à 30° et traités comme les essais précédents, avec cette différence qu'au point d'entrée de l'air d'aspiration, entre les tubes à chaux sodée et le récipient du sol, on intercala un tube de verre, de 80 centimètres de long, préalablement chauffé, et qu'on remplit de coton purifié à l'éther pour recueillir les microorganismes de l'air atmosphérique.

Pour comparer les influences des divers moyens employés sur la décomposition des matières organiques, on représenta par 100 la quantité d'acide carbonique dégagée sous l'action de l'eau pure et les autres résultats (moyennes de 6-9 prises d'essai) furent inscrits en ordre décroissant dans le tableau suivant. Les quantités des produits antiseptiques employés se rapportent à 100 parties des matières essayées pesées à l'état humide.

LA MATIÈRE a été additionnée de :	ANTISEPTIQUE p. 100 de matière.	ACIDE carbonique dégagé.
Eau	»	100.0
Acide salicylique	0.030	98.4
Sulfate de strychnine	0.210	92.5
Brome	0.045	87.9
Benzoate de soude	1.050	87.0
Chlore	0.045	85.0
Salicylate de soude	1.050	80.5
Valérianate de zinc	0.045	77.3
Iodoforme	0.045	71.7
Acide borique	0.330	48.9
Sulfate de cuivre	0.045	47.1
Acide borique	0.670	44.9
Chloroforme	»	44.3
Borate de soude	1.050	35.6
Acide carbolique	0.110	33.5
Iode	0.015	33.3
Benzol	1.050	19.1
Nitrate d'argent	0.045	12.1
Acide cyanhydrique	0.045	11.6
Acide chromique	0.045	11.2
Thymol	1.050	7.8

LA MATIÈRE a été additionnée de :	ANTISEPTIQUE p. 100 de matière.	ACIDE carbonique dégagé.
Bichlorure de mercure. . . .	0.045	6.8
» »	0.090	7.5
Bichlorure de mercure. . . .	0.180	6.1
» »	0.360	6.9
» »	0.720	6.8
Acide carbolique	1.110	5.7
Température de 115° C. . . .	»	2.3

Ces chiffres[1] montrent clairement que *la production d'acide carbonique est presque complètement arrêtée si l'on ajoute aux substances organiques en décomposition des solutions de bichlorure de mercure, de thymol et d'acide carbolique* (ce dernier assez concentré) *ou si on les porte à une température de 115°.*

Ces influences ressortent encore plus nettement si l'on examine, non plus la moyenne des résultats, mais les derniers chiffres de chaque série d'expériences. Les matières analysées contiennent, en effet, souvent de l'acide carbonique provenant des processus de décomposition antérieurs à l'addition des antiseptiques et cet acide est entraîné par l'air en quantités d'abord assez grandes, puis de plus en plus petites, si bien que l'air extrait ne renferme pas seulement l'acide carbonique formé pendant la durée de l'expérience, mais encore une partie de celui qui a pu se dégager auparavant.

Il est donc rationnel de considérer surtout les résultats finaux qui font mieux ressortir les influences étudiées et que nous donnons ci-dessous.

Production d'acide carbonique.

A la température ordinaire de.	100,0	Sans bichlorure de mercure.	100,0
A 115°	1,2	Avec — .	4,5

1 Ces chiffres ne peuvent naturellement donner aucune idée générale sur l'action spécifique des différents antiseptiques, parce qu'elle dépend essentiellement de la concentration de la solution, comme le montrent les essais avec les acides carbolique et borique, et que peu de substances ont été employées en mêmes proportions. Dans les essais précédents il s'agissait surtout de trouver un moyen de tuer les microorganismes et ce but devait pouvoir être atteint complètement.

On voit que l'oxydation du carbone, surtout par l'emploi de la chaleur, est presque réduite à 0.

Les expériences précédentes ne décident pas si cette petite quantité d'acide résulte d'une faible réaction chimique ou plutôt d'un lent dégagement de gaz provenant de décompositions antérieures et retenu par la matière organique en vertu de son pouvoir extraordinaire d'absorption.

Pour le but que nous poursuivons, il suffit d'avoir prouvé que la production d'acide carbonique cesse presque complètement dans les substances en train de se décomposer, quand elles sont soumises à un traitement capable de tuer les microorganismes qui y pullulent. Il faut donc conclure que *l'oxydation du carbone dans la décomposition des matières organiques doit être considérée comme étant surtout un fait de chimie physiologique, puisqu'il est lié aux conditions d'existence des microorganismes.*

La preuve de l'intervention des microorganismes dans l'oxydation des matières organiques a été fournie aussi par Th. Schlœsing et A. Müntz[1] en ce qui concerne la transformation de l'ammoniaque en acide nitrique. Ils ont fait passer des vapeurs de chloroforme à travers un sol où la nitrification était active et qu'ils arrosaient ensuite de purin. Si la nitrification était influencée par des êtres organisés, elle devait cesser après addition du chloroforme qui suspend leur activité ; c'est ce qui arriva. L'eau de filtration contenait de l'ammoniaque en plus grande quantité, mais les nitrates et les nitrites avaient diminué. Dans le dernier essai, Schlœsing chauffa le sol à 100°, ce qui arrêta toute production d'acide nitrique.

R. Warington[2] confirma les résultats de Schlœsing et Müntz et montra que le sulfure de carbone avait la même action. Le sol était contenu dans des tubes en U. Dans un des échantillons passait, par aspiration, de l'air privé d'ammoniaque ; dans les deux autres, de

1. *C. R.*, t. LXXX, p. 1250 ; t. LXXXIV, p. 301 ; t. LXXXV, p. 1018, et t. LXXXVI, p. 892. Déjà auparavant, Pasteur (1862) et Alex. Muller, *Versuchsstationen*, vol. XVI, p. 273, avaient exprimé l'idée que la nitrification devait être le résultat de l'activité de certains microbes.

2. *Journal of the Chemical Society*, janvier 1878.

l'air filtré sur une éponge imbibée, pour l'un, de chloroforme et, pour l'autre, de sulfure de carbone.

L'analyse du sol donna les résultats suivants :

Azote sous forme de nitrates et de nitrites par million de parties du sol desséché à l'air.

	I.	II.
Existant primitivement	6,12	8,91
Après ventilation avec air pur	40,87	50,86
Après ventilation avec air imprégné de sulfure de carbone.	6,70	9,75
— — de chloroforme	9,48	7,86

Le fait que le sol fortement chauffé perd la faculté d'oxyder l'azote a été de même confirmé par des recherches de J. VON FODOR[1]. Celui-ci chauffa un échantillon de sol à la flamme d'un fourneau et l'arrosa chaque jour de 6 à 8 centimètres cubes d'urine bouillie étendue au dixième. Sol et urine furent, en outre, préservés des poussières atmosphériques et des bactéries qui s'y trouvent. Le liquide clair qui filtrait goutte à goutte était très différent de celui qui s'écoulait du même sol non chauffé. 100 centimètres cubes de la solution filtrée contenaient :

	SOL	
	non chauffé.	chauffé.
	milligr.	milligr.
Ammoniaque	1,75	1,50
Matière organique	19,20	84,04
Nitrate et nitrite	92,00	0

Dernièrement, H. PLATH[2] a aussi établi, par des essais concluants que la terre stérilisée ne peut nitrifier l'ammoniaque et que, en l'absence de tout organisme, les substances alcalines sont incapables de provoquer l'oxydation de l'ammoniaque à l'aide de l'oxygène atmosphérique.

En présence des résultats acquis jusqu'ici, il semble légitime de conclure que *la nitrification de l'ammoniaque ne résulte pas de*

---

1. *Hygienische Untersuchungen über Luft, Boden und Wasser.* Braunschweig, 1882.

2. *Landw. Jahrbücher,* par H. THIEL, vol. XVI, livre 6, pp. 891-915.

réactions inorganiques[1], *mais est liée intimement à l'intervention des microorganismes.*

Comme la formation de l'ammoniaque dans la décomposition des matières organiques doit être considérée, d'après MARCHAL[2], comme un processus d'oxydation, il y aurait encore à rechercher s'il doit être attribué à des microorganismes. Les essais concordants de A. MUNTZ et H. COUDON[3] nous fournissent une réponse positive. Ils ont dosé, par le même procédé, l'ammoniaque dans de la terre qui avait été stérilisée en la chauffant à 120° et dans de la terre ensemencée avec une petite portion de terre non stérilisée. Il va de soi que tous les échantillons furent soumis aux conditions reconnues comme les plus favorables au maintien de l'ammoniaque formée. Le résultat fut que, après 67 jours, il ne s'était pas du tout formé d'ammoniaque dans le sol stérilisé, tandis que, dans l'autre, 100 grammes de terre avaient produit 41-110 milligrammes d'ammoniaque. Donc la formation de ce corps était complètement interrompue par l'absence des microbes, et des réactions purement chimiques sont incapables, semble-t-il, de produire de l'ammoniaque. Même après deux ans et demi, la terre stérilisée n'accusait aucune augmentation d'ammoniaque, tandis qu'elle se développait abondamment après l'addition d'un petit fragment de terre de jardin. *C'est donc exclusivement aux microorganismes qu'il faut attribuer la formation de l'ammoniaque.* Ceux-ci sont très résistants; une température de 110° prolongée pendant une heure n'a pu les tuer; ce n'est qu'à 120° que leur activité est sûrement détruite.

Les microorganismes interviennent aussi dans les processus de réduction, c'est-à-dire dans la **putréfaction**. Ce fait est démontré déjà par les recherches de P. P. DEHÉRAIN[4] sur la décomposition du fumier d'étable et de la paille; la fermentation forménique y cesse totalement par l'addition de chloroforme ou par le chauffage à 85°. De même la réduction des nitrates (la dénitrification) cesse, comme

1. Telles que l'action de la foudre ou de la mousse de platine. (Trad.)
2. V. p. 4.
3. *C. R.*, t. CXVI, 1893, p. 395.
4. *C. R.*, t. XCVIII, 1884, n° 6; t. XCIX, n° 1.

l'ont montré U. GAYON et G. DUPETIT[1], quand la solution en expérience est additionnée de chloroforme ou de sulfate de cuivre, ou qu'elle est stérilisée par l'élévation de la température. Ces faits ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que des microbes interviennent dans ces réactions.

Pour être complet, citons encore l'observation d'Alex. MULLER[2] : la fermentation ammoniacale de l'urée semble liée à l'activité des microorganismes, puisque en ajoutant de l'acide sulfurique, de l'acide nitrique et de l'acide chlorhydrique, mais surtout de l'acide sulfureux, du chlorure de calcium, du sulfure de carbone et du chloroforme, la réaction s'affaiblit dans une énorme proportion.

Quoique, d'après tous les résultats précédents, on doive admettre actuellement avec certitude que les processus chimiques qui se présentent dans la destruction des matières organiques sont influencés par des microbes, satisfaction n'est pas encore donnée, tant s'en faut, à tous les désidérata de la science ; on ira évidemment plus loin et, pour pouvoir porter un jugement sur les influences que l'organisme vivant exerce par ses processus vitaux, il faudra apprendre à connaître cet organisme lui-même, ses formes et ses propriétés. Dans ce but, il sera surtout nécessaire d'approfondir les relations qui existent entre les divers organismes et chacun des processus chimiques caractéristiques. On a, jusqu'ici, relativement peu travaillé dans cette direction ; on n'a guère fait que donner une idée approchée des questions à résoudre.

Pour simplifier l'exposition, il semble logique de parler d'abord des réactions qui se passent en présence de l'oxygène et de mettre à la suite celles qui entrent en jeu quand l'accès de l'air est entravé ou complètement supprimé. A l'exemple de PASTEUR, on pourrait désigner, au point de vue biologique, les organismes de la première catégorie sous le nom d'*aérobies* et ceux du second groupe sous le nom d'*anaérobies* (voir le chapitre VI).

L'érémacausis, qui est caractérisée, comme nous l'avons montré, par la formation d'acide carbonique, d'eau, d'ammoniaque, de

1. *C. R.*, t. XCV, p. 644 et 1365.
2. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XXXII, 1885, p. 271.

nitrates et de sulfates, se fait, sans doute, avec le concours d'organismes ayant une grande puissance d'oxydation. Les mucorinées n'interviennent que si la substance est faiblement acide; quand elle a une réaction neutre ou faiblement alcaline, certains schizomycètes jouent le rôle capital. Un petit nombre seulement a été étudié de près jusqu'alors; ce n'est que pour la nitrification et la formation de l'ammoniaque qu'on est arrivé à déterminer les organismes qui les provoquent.

Th. Schlœsing et A. Müntz, qui ont montré les premiers que la nitrification dans le sol était due à des ferments organisés, se servaient de solutions dans lesquelles la nitrification se fait fort bien quand elles sont convenablement préparées et bien aérées. Ils ont employé des eaux d'égout claires ou stérilisées ou des solutions alcalines étendues auxquelles ils ajoutaient les principes minéraux nécessaires, un sel ammoniacal et de la matière organique. Les solutions étaient si claires, que l'on ne pouvait y découvrir au microscope aucun corps organisé et elles restaient telles indéfiniment après avoir été chauffées à 110°. Mais si l'on y apportait une trace de terre en donnant un accès suffisant à l'oxygène (de l'air flambé et filtré), au bout de peu de jours, avec une température convenable, la nitrification commençait. On voyait alors au microscope de nombreux corpuscules allongés très petits qui offraient une grande ressemblance avec les *corpuscules brillants* trouvés dans les eaux par Pasteur et déjà auparavant par R. Koch et F. Cohn. Si l'on portait dans d'autres solutions stériles une portion des liqueurs en train de nitrifier, on obtenait des liquides où se formaient des nitrates sans que l'on pût y trouver d'autres organismes que ceux qui viennent d'être décrits. Il paraît donc hors de doute que cet organisme provoque l'oxydation de l'azote, et Schlœsing et Müntz l'ont considéré comme le ferment nitrique. Ils réussirent aussi à extraire du sol des bactéries qui avaient le pouvoir de transformer les sels ammoniacaux en nitrates. De ce fait que dans l'air il n'y a pas d'organismes nitrifiants, ces savants concluaient que toutes les espèces de bactéries n'ont pas cette faculté de nitrification et qu'elle est dévolue seulement à certaines espèces vivant dans le sol et dans l'eau.

Dans des recherches ultérieures, A. Müntz[1] a trouvé que les organismes nitrifiants ne donnaient lieu qu'à la formation de sels nitreux et que, si les nitrites se trouvaient rarement dans le sol, cela tenait à leur rapide oxydation sous l'action simultanée de l'air et de l'acide carbonique, celui-ci mettant en liberté, par la formation d'un carbonate, l'acide nitreux qui se combine directement à l'oxygène pour donner de l'acide nitrique. On ne pourrait donc pas du tout conclure de la présence des nitrates dans le sol à celle d'un ferment nitrique spécifique.

J. M. H. Munro[2] arrive, dans ses recherches, à cette conclusion que la nitrification s'accomplit sous l'influence de deux ferments dont l'un opère la transformation des matières azotées en ammoniaque et l'autre l'oxydation de l'ammoniaque formée en nitrites et nitrates. Th. Leone[3], s'appuyant sur des essais de cultures pures, est d'avis que ces mêmes organismes qui produisaient de l'ammoniaque en présence des matières organiques donnent lieu, en leur absence, aux processus de la nitrification.

A. Celli et F. Marino-Zucco[4] ont conclu de leurs observations que les bactéries, notamment le *Micrococcus cereus,* pouvaient bien provoquer la nitrification, mais qu'elles la favorisaient seulement d'une manière très active, sans en être la condition indispensable. Les recherches de F. Uffelmann[5] l'ont amené à ce résultat que l'acide nitreux de l'eau et du sol pouvait provenir de l'air, mais qu'il devait son origine première à un processus biologique, non à une simple action chimique de l'oxygène. En opposition avec les résultats précédents, L. Adametz[6] n'a pu trouver dans deux sols une bactérie qui eût la propriété de transformer de notables quantités d'ammoniaque en acide nitrique; il n'a pas trouvé le *ferment nitrique.*

1. *C. R.,* t. CXII, 1891, p. 1142.
2. *Journ. of the Chem. Soc.,* 1886, p. 632.
3. *Gazetta chemica italiana,* t. X, p. 405.
4. *Atti della R. Accad. dei Lincei, C. R.,* série 4, vol. II, 1886, p. 519.
5. *Archiv für Hygiene,* vol. IV, p. 82.
6. *Untersuchungen über die niederen Pilze der Ackerkrume.* Inaug. Dissert. Leipzig, 1886.

W. Heraeus[1] a pu prouver que le *Micrococcus prodigiosus*, des bactéries radiciformes, le spirille du fromage, les bactéries de Finkler, les bacilles du typhus et du sang de rate, le *Staphylococcus citreus* transforment l'ammoniaque en acide nitreux. Il y aurait donc plusieurs schizomycètes capables de nitrifier.

En connexion avec les résultats de Heraeus, F. Hueppe[2] a démontré qu'il y a certaines bactéries incolores qui peuvent, à l'obscurité, former à l'aide de carbonate d'ammoniaque un hydrate de carbone semblable à la cellulose; il se dégage de l'oxygène qu'on ne peut cependant mettre en évidence, parce qu'il est aussitôt utilisé pour l'oxydation de l'ammoniaque en acide nitrique. Les organismes dits purpurbactéries qui dégagent de l'oxygène à l'obscurité se comportent de même. Des bactéries de cette sorte qui, en l'absence de lumière, assimilent du carbone et dégagent de l'oxygène posséderaient donc, en somme, le pouvoir d'oxyder l'azote de l'ammoniaque[3].

Pour isoler les organismes nitrifiants, P. E. Frankland et G. C. Frankland[4] ont fait, pendant trois ans, des essais infructueux jusqu'à ce que l'emploi de la méthode par dilution leur eût donné une forme de *Bacillococcus* qui nitrifiait, mais qui, transporté sur la gelée de peptone, ne croissait plus, se développait pourtant abondamment dans le bouillon de viande et, cultivé dans ce milieu, pullulait alors activement sur la gelée de peptone. Transporté dans les solutions ammoniacales, l'organisme isolé nitrifiait fortement.

R. Warington[5] s'est occupé très activement, durant de longues années, de la nitrification et, après bien de vains efforts, réussit à obtenir, d'une part, un ferment organisé qui oxyde l'ammoniaque seulement en acide nitreux, mais qui, introduit dans les solutions nitreuses, ne peut former de nitrates, et, de l'autre, un ferment nitrique pur qui se développe dans les solutions minérales et trans-

1. *Zeitschrift für Hygiene*, vol. I, 1886, p. 211.
2. *Tageblatt d. Naturf.-Vers. in Wiesbaden*, 1887.
3. Depuis, on a reconnu que de nombreuses espèces microbiennes pouvaient transformer l'ammoniaque en nitrate. (Trad.)
4. *Chemical News*, vol LXI, n° 1582, p. 135.
5. *On nitrification Journ. of the Chem. Soc.*, 1878, 1879, 1884, 1891.

forme énergiquement les nitrites en nitrates, mais est incapable par lui-même de décomposer l'ammoniaque en nitrite ou nitrate.

Ces découvertes ont été confirmées, dans leurs points essentiels, par les résultats de recherches très soigneusement faites par S. WINOGRADSKY[1]. Il a établi que les organismes nitrifiants se multipliaient vite dans des milieux ne contenant que de l'ammoniaque et des sels minéraux sans trace de matière organique et qu'ils sont donc en état d'assimiler le carbone de l'acide carbonique. En s'appuyant sur cette notion, WINOGRADSKY réussit, par des cultures dans des dissolutions de silice ou de silice gélatineuse auxquelles on ajoutait de l'ammoniaque et des sels minéraux nutritifs, à éliminer tous les autres microbes des matières organiques et à cultiver à l'état pur les organismes de la nitrification. De ceux-ci les uns pouvaient transformer l'ammoniaque en acide nitreux seulement, tandis que les autres avaient exclusivement la propriété de transformer les nitrites en nitrates, mais sans pouvoir provoquer l'oxydation de l'ammoniaque sous forme de nitrite ou de nitrate.

Dans une terre de Zurich, WINOGRADSKY a pu distinguer deux formes parmi les organismes nitreux isolés, une monade et une zooglée. La première consiste en corpuscules ronds, très mobiles, avec un court flagellum, qui troublent la solution et ne se montrent que quand la solution est riche en ammoniaque. La seconde forme, au fond de la liqueur claire, des masses floconneuses, immobiles, sphériques, réunies par une substance gélatineuse qui offre un aspect non moins caractéristique.

Des sols provenant de diverses contrées de l'Europe, de l'Asie et de l'Afrique, traités de la même façon, ont donné aussi, comme ferments nitreux, des monades et des zooglées qui, sous les deux formes, offraient la plus grande ressemblance avec celles trouvées à Zurich. Seulement les monades de Java possédaient un plus long flagellum, ce qui rendait leurs mouvements moins actifs que ceux des monades d'Europe et spécialement de Zurich. Des sols de l'A-

---

1. *Annales de l'Institut Pasteur,* 1890, n°s IV et V, pp. 113 et 257 ; 1891, n° IX, p. 577, *C. R.*, t. CXIII, 1891, n° 2, p. 89 ; *Archives des sciences biologiques,* publiées par l'Institut impérial de médecine expérimentale à Saint-Pétersbourg, 1892, t. I, n°s 1 et 2, p. 86.

mérique du Sud et de l'Australie ont paru contenir des nitrosomicrobes d'une tout autre sorte ; mais, faute de matériel, les observations n'ont pu être faites jusqu'au bout. Seulement WINOGRADSKY a pu isoler les nitrosomicrobes d'une terre de Quito ; ils étaient toujours plus grands que ceux précédemment décrits, ne se coloraient pas, avaient une membrane gélatineuse assez épaisse et leur mobilité n'a pu être mise en évidence. WINOGRADSKY les désigne sous le nom de *Megalococcus;* ces formes ont été rencontrées aussi dans des sols de Melbourne et du Brésil.

Les organismes de la nitrification, qui consistent exclusivement en petits bâtonnets, sont très différents des précédents. Ce bacille possède à un haut degré, comme l'ont établi les récentes recherches de R. BURRI et A. STUTZER, le pouvoir d'oxyder les nitrites en nitrates avec le concours de l'oxygène atmosphérique. Ceci n'a pourtant lieu que si le *substratum* nitreux est pauvre en matière organique ; car, dans le cas contraire, la quantité de nitrates reste la même et le bacille se multiplie aux dépens de la matière organique. « La transformation des nitrites en nitrates ne fait probablement que produire une source d'énergie que le bacille, en vertu d'un ferment spécifique qui lui est propre et intimement lié au protoplasma, peut utiliser quand font défaut les combinaisons azotées. »

WINOGRADSKY propose de désigner sous le nom de nitrobactéries tout le groupe des microbes qui transforment l'ammoniaque en acide nitrique. Les ferments nitreux de l'ancien monde formeraient le genre *Nitrosomonas* avec les deux espèces *N. europæus* et *N. javanensis;* ceux du nouveau monde formeraient le genre *Nitrosococcus*. Le ferment nitrique s'appellerait *Nitrobacterium*.

A. MÜNTZ et H. COUDON[1] ont cherché à déterminer si la **formation de l'ammoniaque** dans la décomposition des matières organiques était due à un ferment unique ou si plusieurs des espèces abondamment répandues dans le sol y contribuaient. Ils ont isolé, dans ce but, d'entre les microorganismes du sol les plus fréquents, cinq espèces (3 bacilles, 2 micrococcus) et les ont semées ainsi que deux mucorinées (*Mucor racemosus* et *Fusarium*) sur de la terre addi-

1. *C. R.,* t. CXVI, 1893, p. 395.

tionnée d'engrais organique. Cette terre ne formait pas d'ammoniaque avant, tandis qu'après l'ensemencement des microbes elle en produisit et sous l'influence de tous les organismes essayés, quoique en plus ou moins grande quantité. Cette réaction se différencierait par là nettement de la nitrification qui semble n'être due qu'à un organisme bien déterminé. *Beaucoup des microorganismes qui habitent le sol peuvent former de l'ammoniaque.*

Des recherches de E. Marchal[1] il résulte que cette production se fait sous l'influence de divers microbes (bactéries, levures, mucorinées) habitant les couches supérieures du sol. Dans la terre travaillée, ce sont les bactéries qui dominent; dans les sols humiques, acides, ce sont les mucorinées qui contribuent surtout à cette réaction.

Parmi les bactéries, le bacillus mycoïde (*Erdbacillus* des auteurs allemands), qui a été découvert par Flügge et décrit plus tard très complètement par Frankel sous le nom de bacille en racine (*Wurzelbacillus*), s'est montré le plus actif dans cette formation d'ammoniaque. Les cultures faites avec ce bacille dans des dissolutions d'albumine à 10 p. 100 stérilisées ont montré que dans l'air du ballon il y avait absorption notable d'oxygène avec un dégagement correspondant d'acide carbonique et que les produits gazeux de décomposition manquaient d'hydrogène comme d'oxygène. Dans la solution même, à la place de l'albumine complètement détruite, on trouva de l'ammoniaque et de l'acide carbonique avec de faibles quantités de peptone, leucine, tyrosine, acides gras et acide sulfurique.

Les cultures avec d'autres substances azotées ont donné les résultats suivants. Les principes albuminoïdes, caséine, fibrine, gélatine, gluten, légumine, myosine et peptone, furent, tout comme l'albumine, oxydés par le bacille avec formation d'ammoniaque; de même le sérum du sang et le lait. Même les combinaisons azotées non albuminoïdes, leucine, tyrosine, créatine et asparagine, furent transformées en ammoniaque; mais l'urée, qui se décompose si aisément en carbonate d'ammoniaque, se comporta autrement.

1. *Bulletin de l'Académie de Belgique,* série 3, t. XXV, 1893, p. 727.

En solution stérilisée ensemencée avec le bacillus mycoïde, l'urée n'offrit pas à ce dernier un terrain de culture favorable ; l'*Erd-bacillus* ne s'y développa point, non plus que dans les solutions qui contenaient du nitrate d'urée et des sels ammoniacaux.

Quant aux mucorinées, MARCHAL[1] constata que, dans tous les essais où les diverses espèces expérimentées s'étaient développées abondamment, il y avait eu production d'ammoniaque. Mais dans aucun cas on ne put déceler la présence des nitrates, soit dans la solution albuminoïde, soit dans le mycélium. Les mucorinées ne peuvent donc produire des nitrates à l'aide des matières albuminoïdes. Il se forma du reste aussi peu de nitrates dans les cultures où l'azote avait été fourni aux champignons exclusivement sous forme de sel ammoniacal.

Suivant cet auteur, les mucorinées jouent un rôle considérable dans la transformation en ammoniaque de l'azote combiné à l'état organique dans le sol. Si divers expérimentateurs, comme, par exemple, L. FRANKEL (chap. V), ont trouvé si peu de mucorinées dans le sol, cela tient en première ligne à la réaction alcaline des milieux de culture qu'ils ont employés. Par l'emploi de solutions acides MARCHAL put isoler de divers sols un grand nombre de mucorinées différentes dont une espèce nouvelle d'aspergillus, très répandue, qu'il nomma *Aspergillus terricola*.

Parmi les fermentations liées à la présence de l'air, il y aurait à citer ici la fermentation acétique qui est due à des microorganismes, au *Mycoderma aceti* (*Micrococcus aceti*, *Bacillus aceti*) d'après les anciennes données, à deux espèces de bactéries d'après HANSEN, le *Bacterium aceti* et le *B. pastorianum*, auxquelles il faut ajouter, d'après PETERS, une autre bactérie et, d'après LAFAR, encore un hyphomycète.

D'après les résultats acquis jusqu'alors, on doit admettre que les processus de la décomposition, quand l'accès de l'air est limité, voire supprimé, sont, eux aussi, dus à l'activité vitale d'organismes inférieurs.

La fermentation forménique que l'on constate dans la putréfaction

1. *Bulletin de la Société belge de microscopie*, t. XIX, 1893, p. 65-74.

est due, comme l'ont montré P. P. DEHÉRAIN et U. GAYON[1], à des microbes dont les caractères morphologiques sont encore incomplètement connus. D'après F. HOPPE-SEYLER[2], c'est le *Bacillus butyricus* PRAZMOWKSY (*Bacillus amylobacter* VAN TIEGHEM, *Clostridium butyricum*) qui doit surtout provoquer cette réaction[3].

Le dégagement d'hydrogène observé par DEHÉRAIN et caractérisé par la présence simultanée de l'acide butyrique est également provoqué par des microorganismes qui doivent différer de ceux de la décomposition forménique, parce que leur activité n'est pas liée à l'accès de l'air, mais persiste sans interruption en l'absence de l'air. D'après DEHÉRAIN, il doit y avoir deux ferments organisés dont l'un donne du formène, l'autre de l'hydrogène et de l'acide carbonique. On a soutenu, depuis, que l'un excluait l'autre, si bien qu'il arrivait rarement que les gaz dégagés dans la fermentation continssent en même temps du formène et de l'hydrogène : cela peut arriver cependant.

Selon H. TAPPEINER[4], déjà dans la panse, le bonnet et le gros intestin du veau, il y a une fermentation de la cellulose due à des bactéries qu'on n'a pu réussir encore à élever en culture pure.

Les autres hydrates de carbone subissent de même de nombreuses transformations (ou dédoublements) auxquelles prennent part maintes espèces de bactéries. Pour l'amidon nous savons qu'il est dissous par diverses bactéries et transformé en principe sucré soumis ensuite à d'autres transformations ou brûlé en donnant de l'acide carbonique et de l'eau. Parmi les processus en question, il faut penser d'abord à la fermentation lactique provoquée par le *Bacillus acidi lactici ;* outre ce bacille, il y a une série d'organismes (*Pediococcus acidi lactici* LINDNER, bactéries lactiques de HUEPPE, ZOPF, PETERS, WEIGMANN, STORCH et QUIST) qui provoquent les mêmes réactions quoique à un plus faible degré.

1. *Journal de l'agriculture,* 1884, n° 781, p. 507.

2. *Zeitschrift für physiologische Chemie,* vol. X, 1886.

3. Le *Vibrio rugula* (*Spirillum rugula*) est aussi à signaler. La fermentation forménique est sous la dépendance de divers microbes *anaérobies*. On ne connait pas d'aérobie qui dégage du formène. (Trad.)

4. *Zeitschrift für Biologie,* vol. XIX, p. 288 ; vol. XX, p. 52.

Le *Bacillus butyricus* gouverne la fermentation butyrique que d'autres bactéries encore, comme, par exemple, les bacilles butyriques de Liborius et Hueppe, paraissent capables de susciter.

La fermentation alcoolique est due à l'activité de diverses levures (*Saccharomyces*) parmi lesquelles il faut citer en première ligne : *Saccharomyces cerevisiæ, S. pastorianus, S. ellipsoideus, S. Marxianus, S. exiguus* et *S. Ludwigii* et aussi de diverses bactéries.

La fermentation des acides gras et des acides organiques végétaux est causée aussi par des organismes inférieurs et principalement par des bacilles dont il reste encore à déterminer les caractères morphologiques.

Dans la décomposition des matières albuminoïdes et des combinaisons amidées interviennent de nombreuses bactéries dont l'influence varie suivant leur qualité et leur quantité. Il est, d'ailleurs, bien nécessaire d'arriver à préciser plus exactement leurs produits, bien que les recherches effectuées fournissent déjà à cet égard des repères importants. On sait que le *Bacillus putrifici coli* provoque des réactions à la suite desquelles il se produit des peptones, de la tyrosine, du phénol, de l'indol, du scatol, des acides gras, de l'ammoniaque, etc. Les peptones et les gaz fétides sont produits par *Proteus vulgaris, P. mirabilis* et *P. Zenkeri*. Le *Bacillus butyricus* Hueppe provoque la formation de peptones, leucine, tyrosine, ammoniaque et de matières à goût amer, le *Bacillus fluorescens liquefaciens,* le plus grand producteur d'ammoniaque, celle de peptones, d'acides gras volatils et d'une couleur verte. Le *Bacillus pyocyaneus* et le *B. janthinus* donnent des peptones et de l'ammoniaque. La triméthylamine se forme sous l'influence du *Bacillus ureæ* et du *B. prodigiosus,* l'hydrogène sulfuré et l'ammoniaque sous celle du bacille de Miller (et de maint autre), tandis qu'il se dégage des gaz fétides quand les circonstances favorisent la multiplication du *Bacillus saprogenes I, II, III,* du *B. coprogenes fœtidus,* du *B. pyogenes fœtidus*, du *Micrococcus fœtidus,* etc. Les *Bacillus magnus, B. spinosus, B. liquefaciens* et les bacilles du chancre des fumeurs donnent dans la décomposition de l'albumine séreuse, comme gaz : de l'hydrogène et du méthylmercaptan ; comme acides gras, toute la série ; comme acides amidés, de la leucine et enfin quelques acides

aromatiques. Dans la décomposition de la gélatine, les bactéries précédentes ne produisent ni tyrosine, ni indol, ni scatol, mais de l'acide benzoïque (Nencki[1]).

Le *Bacillus subtilis* est à signaler ici seulement pour sa faculté de peptoniser l'albumine et la gélatine, ce qui prépare ces substances à recevoir d'autres organismes.

Depuis que l'on a réussi à élever en cultures pures les bactéries de la putréfaction, il faut s'attendre que les recherches ultérieures élargiront le cercle de nos connaissances sur la manière d'agir de chaque espèce. Provisoirement on doit se contenter des faits qui précèdent et qui montrent déjà très nettement que la décomposition des principes azotés des matières organiques doit être attribuée à l'action des organismes inférieurs.

Au point de vue agronomique, le processus désigné sous le nom de **dénitrification** offre un grand intérêt. D'après les recherches de U. Gayon et G. Dupetit[2], il est certain qu'on doit le considérer de même que son inverse, la nitrification, comme d'ordre biologique. Ils ont trouvé dans leurs expériences faites sur des nitrates que ceux-ci disparaissaient peu à peu et que la liqueur se remplissait de microorganismes. Ces microbes sont bien la cause de la réduction des nitrates, car la solution restait claire et le nitrate inaltéré quand on la stérilisait en la chauffant ou qu'on y ajoutait du chloroforme et du sulfate de cuivre.

Outre ces organismes qui réduisent ces nitrates jusqu'à l'état d'azote, ces mêmes savants ont trouvé, ultérieurement, d'autres microbes qui n'extraient des nitrates que les deux tiers de leur azote et les transforment en nitrites.

A ces organismes appartient en première ligne un microbe qui a pu être isolé à l'état pur et consiste en petits bâtonnets mobiles donnant peu de spores. Ce microbe (*Bacillus denitrificans*), désigné par la lettre *a*, fut ensemencé dans du bouillon de poule contenant 60 grammes de nitrate de potasse par litre, dans des tubes longs et étroits et dans une atmosphère ou raréfiée ou d'acide carbonique

1. *Monatshefte für Chemie*, 1889, n° 10.
2. *Journal de l'Agriculture*, 1884, n° 781, p. 507.

ou dans le vide. A 35° l'organisme se développait rapidement et troublait la liqueur sans dégager la moindre quantité de gaz. En même temps tout le nitrate se transformait en nitrite, et une faible portion de l'acide carbonique formé pendant la réaction s'était dissoute comme carbonate de potasse. L'oxygène contenu dans l'acide carbonique formé était en plus faible quantité que celle qu'aurait dû donner le nitrate en se décomposant. Comme aucun gaz ne s'est dégagé, la différence d'oxygène a probablement été absorbée par le microbe pour son développement. Cet organisme vit très facilement et a une action réductrice énergique dans le bouillon de poule; il y vit même quand le bouillon est saturé de nitrate de potasse et il peut détruire journellement 10 grammes de nitrate de potasse. Mais il se développe mal dans les solutions artificielles.

Parmi les organismes donnant des nitrites, il y en avait un deuxième, *b*, en longs bâtonnets immobiles avec des spores, et deux microbes dont l'un, *c*, formé de longs filaments riches en spores, l'autre, *d*, de petits bâtonnets immobiles avec chacun une spore. Les quatre microbes ont donné par jour dans du bouillon de poule à 10 grammes de nitrate de potasse par litre : *a*, 9^{gr},6 de nitrite; *b*, 2^{gr},8; *c*, 6^{gr},8 et *d*, 5^{gr},6.

Le microbe du choléra des poules mis à l'essai de la même façon a donné 0^{gr},5, la bactérie du sang de rate 0^{gr},1 et la bactérie septique 0^{gr},8.

La plupart des microorganismes doivent posséder la même propriété, mais pas toujours à un aussi haut degré. Jusqu'ici les auteurs susnommés n'en ont trouvé qu'un seul qui, pouvant vivre dans le bouillon additionné de nitrate, ne fournisse pas de nitrite.

Dans le même ordre d'idées, E. Giltay et E. H. Aberson[1] se sont efforcés de trouver un microbe qui réduise les nitrates en nitrites, ammoniaque et azote. Le résultat de leurs recherches fut qu'à Wageningen (Hollande), dans l'automne de 1889 et de 1890, il y avait une bactérie très répandue dans le sol, l'eau et l'air, qui réduisait complètement les nitrates. Sa culture à l'état pur réussit facilement en exposant à l'air ou additionnant d'un extrait de sol de la gélatine ou

---

1. *Archives néerlandaises*, 1891, t. XXV, p. 341.

du bouillon avec une solution nutritive renfermant par litre 2 grammes de nitrate de potasse, 1 gramme d'asparagine, 2 grammes de sulfate de magnésie, 5 grammes d'acide citrique, 2 grammes de phosphate monobasique de potasse, $0^{gr},2$ de chlorure de calcium et quelques gouttes de chlorure de fer et en neutralisant par de la potasse.

Très remarquable est cette observation de E. MARCHAL[1] que le *Bacillus mycoides* (*Erdbacillus*), qui provoque (on l'a vu plus haut, p. 41) la formation de l'ammoniaque dans des dissolutions d'albumine et de combinaisons amidées, produit dans des dissolutions avec nitrates une réduction de ceux-ci en nitrites et ammoniaque. Si l'on cultive le *B. mycoides* dans une solution de sucre contenant 2 grammes de nitrate de potasse par litre, on constate dans les premiers jours un développement très lent du microbe ; mais, au bout de 2 ou 3 jours, d'épais et nombreux flocons apparaissent dans la liqueur, qui offre la réaction de l'acide nitreux et de l'ammoniaque, ce dernier en grande quantité. Ce processus de réduction, déjà reconnu à ce microbe par d'autres expérimentateurs, est si énergique, qu'après 10-15 jours tout l'acide nitrique est transformé en ammoniaque.

Le même organisme agirait donc tantôt comme oxydant vis-à-vis de l'albumine, tantôt comme réducteur vis-à-vis des nitrates. Le *B. mycoides*, qui se développe en aérobie dans des dissolutions de blanc d'œuf, brûle l'albumine au moyen de l'oxygène de l'air, tandis que dans les solutions sucrées de nitrates il brûle le sucre et emprunte l'oxygène qu'il lui faut aux nitrates facilement réductibles. Mais si réellement le *B. mycoides* peut extraire des nitrates l'oxygène nécessaire à sa respiration, il doit pouvoir vivre comme anaérobie en présence de ces sels et sans oxygène ; c'est ce que l'expérience a montré. Cultivé en solution sucrée et nitratée, le *Bacillus mycoides* vit dans une atmosphère d'hydrogène ou d'acide carbonique aussi bien que dans l'air ordinaire.

Le même cas a été observé par Th. LEONE[2] pour les organismes

---

1. *Bulletin de l'Académie de Belgique*, série 3, t. XXV, 1893, p. 727.

2. *Gazetta chimica italiana*, t. X, p. 505 ; *Atti della R. Accademia dei Lincei, Rendiconti*, série 4, vol. VI, p. 33.

nitrifiants. Il a trouvé qu'en mettant dans de l'eau où la nitrification se faisait normalement un peu de gélatine nutritive ou d'autres substances favorisant le développement du ferment nitrique, la réaction s'arrête et l'acide nitrique déjà formé est réduit en acide nitreux et celui-ci même en ammoniaque. Si au contraire la substance organique est employée en totalité, les microorganismes provoquent alors de nouveau l'oxydation de l'ammoniaque en acides nitreux et nitrique ; les mêmes organismes agissaient donc soit comme oxydants, soit comme réducteurs. Ces phénomènes se manifestèrent aussi quand à une terre de jardin on ajouta du fumier frais. La nitrification fut arrêtée par les microbes dans la terre qui nitrifiait fortement, et il y eut réduction des nitrates et des nitrites avec formation d'ammoniaque. Plus tard la nitrification recommença aussitôt après qu'eut pris fin la production d'ammoniaque.

Quant à l'explication de ce changement surprenant de fonction des organismes nitrifiants, LEONE pense qu'en raison du développement rapide des germes, l'oxydation qu'ils provoquent est si intense que l'oxygène présent n'y suffit pas et qu'une partie doit être empruntée aux acides nitrique et nitreux.

La dénitrification a été étudiée dernièrement par R. BURRI et A. STUTZER[1]. Ils ont d'abord répété une expérience de P. WAGNER[2] montrant que les fèces du cheval provoquent une destruction de nitrate.

Dans un mélange d'eau (100 grammes), de crottin (5 grammes) et de nitrate de soude ($0^{gr},32$), il se produisit à 30°, généralement au bout de 24 heures, une fermentation spumeuse, et après quelques jours, tout le salpêtre disparut.

Le gaz qui se dégage en même temps est de l'azote. Si, au lieu de nitrate on emploie du nitrite de soude, la décomposition du nitrite marche beaucoup plus lentement. Dans un mélange où n'entrent que du crottin et de l'eau, il n'y a pas de fermentation ; mais elle apparaît dès qu'on ajoute du nitrate de soude. La fermentation n'est

---

1. *Centralblatt für Bakteriologie und Parasitenkunde. Zweite Abtheilung,* vol. III, 1895, n° 7-8, p. 257 ; n° 9-10, p. 350 ; n° 11, p. 392 ; n° 12, p. 422.

2. *Deutsche landwirthschaftliche Presse,* 1895, n° 14, p. 123.

pas arrêtée, mais seulement un peu réduite par la cuisson de la liqueur, d'où l'on doit conclure que les agents de la fermentation appartiennent à des espèces qui forment des spores ou qui sont très résistantes.

Les auteurs susnommés ont réussi à isoler deux bactéries sous l'action simultanée desquelles s'accomplit la réduction du nitrate. Voici comme on a démontré que les deux bactéries (*a* et *x*) vivent en symbiose[1] :

Des traces de *a* ont été semées dans du bouillon nitraté en même temps que des traces de *x* dans un autre vase d'égale contenance ; les deux vases furent exposés pendant plusieurs jours à une température de 30°. Les solutions se troublèrent, mais ne dégagèrent pas de gaz.

Dès qu'on mélangea les deux solutions en évitant toute contamination, il se produisit dans l'espace de 12 à 24 heures un vif dégagement de gaz avec formation d'écume.

Dans un autre essai, on fit sur une plaque d'agar une culture de *a* en strie ; elle fut croisée avec une culture de *x*, et, quand elles eurent commencé à se développer, on porta sur du bouillon nitraté une parcelle prise à la sortie d'une strie, une autre parcelle provenant de l'extrémité d'une strie croisée sur la précédente et une troisième provenant du point de croisement. C'est dans ce dernier cas seulement qu'il se produisit de l'écume.

De ces expériences il faut conclure que la destruction des nitrates en présence du crottin est due à une symbiose. En poursuivant cette étude, on montra que *x* ne pouvait être remplacé par un autre organisme, tandis qu'au contraire, au lieu de *a*, on put employer une culture de *Bacterium coli commune* installée depuis longtemps au laboratoire sans qu'il y eût la moindre modification dans le cours de la fermentation. De même le bacille typhique, avec l'aide de *x*, amena la fermentation complète du nitrate.

L'étude approfondie de l'organisme désigné sous la lettre *a* montre qu'il est identique au *Bacterium coli commune*, sauf pour le

1. Sous le nom de *symbiose* on désigne le fait très fréquent dans la nature de deux êtres d'espèces différentes vivant associés : l'un ne peut vivre sans l'autre.

mouvement actif des bactéries dans les jeunes cultures sur plaque, et cette mobilité seule ne suffit pas à différencier les deux espèces. Les deux auteurs précédents ne décident pas si l'on a donné à tort le nom de *Bacterium coli commune* à toute une série d'espèces différentes ou si la grande variabilité de cet organisme affirmée de divers côtés existe réellement ; mais ils arrivent à cette conclusion que le *B. coli commune,* déjà signalé comme agent de nombreuses fermentations, possède encore, en symbiose avec certaines autres bactéries, la propriété de détruire d'assez grandes quantités de nitrates en dégageant de l'azote gazeux.

La bactérie désignée par la lettre x qui, associée au *Bacterium coli* ou au bacille typhique et, sans doute, à d'autres espèces encore, peut détruire d'importantes quantités de nitrate ou de nitrite de la façon qui a été indiquée, a été dénommée par Burri *Bacillus denitrificans I,* cet organisme n'ayant pu être identifié avec aucun de ceux déjà décrits. D'après les observations de cultures pures, le *B. denitrificans I* fait partie des *aérobies vrais* (ou *obligés*), tandis que le *B. coli* est un *anaérobie facultatif.* Les résultats suivants, obtenus par les mêmes auteurs, montrent jusqu'à quel point cette propriété des deux espèces s'accuse dans les fermentations avec divers mélanges d'air.

Dans du bouillon nitraté ensemencé avec le *Bacterium coli* et le *Bacillus denitrificans,* à travers lequel on avait insufflé de l'hydrogène pendant 15 minutes, il n'y eut aucun dégagement d'azote libre : mais tout le nitrate disparut pour se retrouver, sous forme de nitrite surtout, avec un peu d'ammoniaque.

Si cette expérience se répète de la même façon, mais dans un vase ouvert et à l'air libre, il y a fermentation active avec dégagement d'azote. On a aussi observé que tout l'azote du nitrate ne passe pas à l'état élémentaire, et qu'une partie (environ 20 p. 100) repasse dans la solution nutritive à l'état d'azote organique.

Dans ces essais en présence de l'air, celui-ci n'avait qu'un accès très limité.

Si l'on veut ne forcer en rien les résultats précédents, on pourrait seulement en conclure que le *Bacterium coli* associé au *Bacillus denitrificans I,* amène dans les solutions nitratées des phénomènes

de réduction qui, en l'absence complète d'air, se limitent à la formation de nitrites, mais qui, si l'air pénètre en petite quantité, vont jusqu'à la destruction des nitrates, jusqu'au dégagement à l'état gazeux de la plus grande partie de l'azote qu'ils contiennent.

Sous le rapport de l'accès de l'air, ces processus se passeraient dans des conditions qui correspondent à celles de la pourriture.

Mais si Burri et Stutzer concluaient de leurs essais que les deux bactéries, dans un milieu abondamment aéré, décomposent les nitrates en dégageant de l'azote, ce ne serait pas admissible, attendu que rien dans les faits acquis n'autorise cette manière de voir et que sa preuve directe n'a pas été fournie. Ce n'en est pas une que le *B. denitrificans I*, en culture sur plaque, se soit comporté comme un aérobie obligé, parce que maints organismes réagissent très différemment en présence de l'air et que le bacille en question, s'il était un aérobie vrai, ne pourrait provoquer la fermentation du nitrate dans une quantité très limitée d'air.

Il paraît, du reste, bien invraisemblable qu'un processus de réduction qui ne se produit qu'en l'absence d'oxygène ou avec une faible quantité de ce gaz puisse avoir lieu dans des conditions qui, d'après toutes les observations précédentes, ne provoquent que des oxydations. Si la conclusion que Burri et Stutzer ont tirée de leurs recherches était exacte, il faudrait donc admettre que, dans les substances en décomposition bien aérées, il y a, d'une part, des organismes transformant l'azote en nitrate, et, d'autre part, d'autres organismes qui attendent, pour ainsi dire, le moment de détruire les premiers. Une pareille interprétation est contredite non seulement par toutes les observations faites jusqu'ici, mais encore par des faits de diverses sortes, tels que la forte accumulation de nitrates dans les matières organiques azotées (composts, mélanges de fumier d'étable et d'engrais vert) en présence d'air en excès et aussi la concordance entre les quantités d'azote contenues dans les nitrates des eaux de drainage et celles qui se trouvent sous forme d'ammoniaque dans les eaux d'égout répandues sur les champs d'épuration. On pourrait citer aussi cette observation qu'on ne constate que très peu ou point de perte d'azote dans la décomposition du fumier quand, par l'emploi de certains procédés de conservation, d'assez

grandes quantités de nitrates y ont été formées. Ces faits suffiraient à affirmer qu'une destruction des nitrates en présence d'air en excès ne peut être opérée par les organismes précédemment décrits ou bien que, si des recherches ultérieures démontraient l'existence de ce processus dans certaines circonstances, cette réaction serait sans importance.

Le dégagement d'azote donné par les nitrates quand tout accès d'air est fermé est dû à un bacille, déjà trouvé par E. Bréal[1] sur de la vieille paille, ensuite isolé et bien étudié par R. Burri et A. Stutzer[2]. On a réussi à retirer de la paille d'une vieille enveloppe de bouteille un bacille qui prospère aussi bien au contact de l'air qu'en son absence, mais qui, à l'air, n'a aucun pouvoir de fermentation. Il se trouve aussi sur d'autres débris végétaux et sur le sol. Quelques recherches de H. B. Gibson[3] semblent confirmer cette opinion. De la viande qu'on humecta d'une goutte d'une émulsion très diluée de viande en putréfaction ne perdit pendant la décomposition que 2.1 p. 100 d'azote en moyenne, tandis que la perte fut de 12.1 p. 100 après addition d'un extrait de sol. Le bacille en question, désigné sous le nom de *B. denitrificans II*, joue le rôle principal dans la destruction des nitrates en l'absence de l'air.

Dans la **fermentation ammoniacale** de l'urée, l'urine claire se trouble par des organismes inférieurs, au nombre desquels peuvent se trouver divers champignons et bactéries. Le *Micrococcus ureæ* Cohn a été d'abord découvert comme agent de cette fermentation. Pasteur a montré le premier que ce *Micrococcus*, cultivé à l'état pur dans une solution nutritive contenant de l'urée pure, provoque la même fermentation que dans l'urine.

Le *Micrococcus ureæ* découvert par Leube paraît être identique au premier. Flugge a isolé de l'urine putréfiée un autre *Coccus* qui, comme le précédent, fait fermenter énergiquement l'urée, mais montre certaines différences dans la culture ; c'est le *Micrococcus*

---

1. *Annales agronomiques*, t. XVIII, n° 4, p. 181.

2. *Loc. cit.*

3. *Sur le dégagement de l'azote libre dans la putréfaction*. Thèse. Baltimore, 1893 (en anglais).

ureæ liquefaciens. LEUBE a encore trouvé dans de l'urine vieille un *Bacillus ureæ* qui doit transformer l'urée en carbonate d'ammoniaque plus énergiquement encore que le *Micrococcus ureæ*. Le même auteur a pu constater enfin que deux autres bacilles et une *Sarcine* exerçaient vis-à-vis de l'urée un pouvoir énergique d'hydratation.

P. MIQUEL[1] a découvert qu'à côté des *Micrococcus* il fallait aussi attribuer à certaines bactéries en bâtonnet et même à des moisissures la faculté de provoquer une fermentation ammoniacale énergique, et il donne une courte description d'un bacille qu'il a trouvé et qui est désigné sous le nom de *B. Duclauxii* ou *B. ureæ* β.

Dernièrement, R. BURRI et A. STUTZER[2] se sont très activement occupés d'isoler les microorganismes qui produisent la fermentation ammoniacale de l'urée. Ils sont arrivés à ce résultat intéressant qu'ils n'existent pas seulement dans l'air, mais aussi en quantité notable dans le terreau tourbeux. Ils ont pu séparer en cultures pures trois bactéries en bâtonnet qui, sans parler des caractères morphologiques, sont caractérisées comme il suit :

	B. UREÆ I.	B. UREÆ II.	B. UREÆ III.
Fermentation	Modérée.	Énergique.	Énergique.
Gélatine (avec urée) . . .	Liquéfie.	Ne liquéfie pas.	Liquéfie.
Motilité	Existe.	N'existe pas.	Existe.

Ces bactéries de l'ammoniaque sont de celles qui peuvent se multiplier en présence d'une grande quantité d'alcali libre.

Dans un substratum nutritif neutre et surtout acide, elles ne se développent pas et ne montrent aucun pouvoir hydratant ; elles n'y meurent pourtant point et peuvent s'y maintenir vivantes pendant des années ; il en est ainsi, du moins, de celles qui forment des spores (*B. ureæ II* et *III*). Ainsi s'explique facilement la présence des bactéries de l'ammoniaque dans le terreau tourbeux qui est acide.

Les *Sulfobactéries*, parmi lesquelles il faut compter surtout, d'après les recherches de S. WINOGRADSKY[3], *Beggiatoa alba* VAUCH,

1. *Annales de Micrographie,* 1889 à 1898.
2. *Journal für Landwirtschaft,* 42e année, 1894, p. 338.
3. *Botanische Zeitung,* 1887, nos 31-37.

B. roseo-persicina ZOPF (*Clathrocystis roseo-persicina* COHN), *Sarcina sulfurata nov. sp.*, *Ophidomonas sanguinea*, *Monas Okenii*, *Monas vinosa* EHR, et quelques autres encore, amènent le dépôt du soufre par oxydation de l'hydrogène sulfuré. WINOGRADSKY a montré que l'oxydation qui commence par la destruction de l'hydrogène sulfuré se continue dans les cellules, tandis que le soufre qui y est séparé s'oxyde même jusqu'à l'état d'acide sulfurique. Il a pu déterminer par des réactions microchimiques l'acide sulfurique non seulement qualitativement, mais presque quantitativement. Les carbonates contenus dans l'eau sont transformés en sulfates par l'acide sulfurique que séparent les bactéries vivantes.

Cet auteur pense que le processus d'oxydation chez les *Sulfobactéries* correspond à la respiration et que le soufre y joue le même rôle que les hydrates de carbone chez les autres plantes. Par la combustion du soufre, ces bactéries acquièrent l'énergie nécessaire pour entretenir leurs processus vitaux. Elles peuvent ainsi se contenter d'une très faible quantité de matière organique ; car toutes les combinaisons carbonées leur servent exclusivement comme éléments plastiques, tandis que chez les autres plantes elles sont employées à la respiration pour la plus grande partie. Les matières organiques nécessaires à la croissance des *Sulfobactéries* n'ont donc pas besoin d'être de *bons aliments*, c'est-à-dire des combinaisons dégageant beaucoup de chaleur dans leur combustion ; des corps tels que les acides formique et propionique dont d'autres organismes ne peuvent rien faire, suffisent aux sulfobactéries.

Le dégagement d'hydrogène sulfuré qui se produit par réduction des sulfates et nitrates de soude en présence du formène à l'état naissant dans la putréfaction des matières organiques[1] est indépendant des Beggiatoacées, d'après WINOGRADSKY.

Celui-ci a étudié aussi l'action de certaines bactéries qu'il appelle des *ferrobactéries*[2] (*Eisenbacterien*) et qui sont surtout représentées par *Cladothrix dichotoma* COHN (*Leptothrix ochracea* KUTZING) et par *Crenothrix Kühniana* RABENHORST. Ces organismes ont la

1. V. *ante*.
2. *Botanische Zeitung*, 1888, n° 17.

faculté d'oxyder le protoxyde de fer en le séparant de sa combinaison carbonatée.

Cette adjonction de protoxyde de fer indispensable à la croissance des filaments de *Cladothrix* est des plus remarquables. Tandis qu'ils végètent très vigoureusement dans de l'eau contenant du protoxyde de fer et renouvelée deux à trois fois par jour, ils ne s'accroissent plus si on laisse l'eau exposée d'abord quelque temps à l'air de façon qu'elle ne contienne plus de protoxyde. Celui-ci dont s'empare avidement le *Cladothrix* en croissance est oxydé dans le protoplasma et probablement donné sous forme de combinaison oxydée soluble à l'enveloppe gélatineuse qui entoure la cellule et qui retient le sel. Ce dernier peut d'abord facilement se dissoudre dans l'eau, même vingt-quatre heures après qu'il s'est déposé ; plus tard l'oxyde de fer se transforme et devient difficilement soluble, même insoluble.

Les autres ferrobactéries concordent dans leurs propriétés essentielles avec le *Cladothrix* étudié.

Nous avons affaire ici à un caractère physiologique d'une classe de bactéries que Winogradsky comprend, pour ce motif, sous le nom de ferrobactéries. Ce caractère acquiert une assez grande importance par son analogie avec celui des sulfobactéries. Dans les deux cas, une substance oxydable est extraite par les cellules, portée dans leur plasma au maximum d'oxydation et ensuite excrétée. Ni le soufre ni le fer ne servent à la structure de ces organismes ; bien plus, ils sont rejetés par les cellules après transformation. Il s'ensuit que la proportion de matière modifiée chimiquement est très grande par rapport à celle des substances assimilées dans le même temps. Comme les ferrobactéries s'accroissent si lentement quand l'oxydation du fer cesse dans leurs cellules, Winogradsky conclut que les réactions vitales de ces organismes sont entretenues principalement ou exclusivement aux dépens de la chaleur (ou énergie) devenue libre par l'oxydation du protoxyde de fer.

Les faits que nous venons d'énumérer, tout incomplets qu'ils soient, permettent de conclure avec certitude que ces diverses réactions qui se présentent dans la destruction des matières organiques sont dues à toute une série de microorganismes. Elles ont lieu soit

dans le protoplasma vivant, soit sous l'influence de produits intermédiaires excrétés par les cellules sous forme de ferments. (Voir chap. VI.) Il ressort du court résumé que nous venons de faire que, suivant toute vraisemblance, chacun des processus constatés est dû non à la présence et à la multiplication d'un seul organisme, mais de plusieurs, au moins le plus souvent. Il semble légitime d'admettre que l'action de maints organismes peut être différente suivant les conditions extérieures. Pour le plus grand nombre des cas, la décomposition n'est pas due dans toutes ses phases à une espèce déterminée ; elle se fait par certains organismes jusqu'à une certaine limite à partir de laquelle elle se continue par d'autres.

Parmi les microorganismes participant à cette destruction, il faut citer surtout les Schizomycètes ou Bactériacées et les Hyphomycètes ; les Levures n'ont qu'une importance secondaire, en ce sens que les réactions qu'elles déterminent ne peuvent s'accomplir dans la nature que dans un faible rayon. Quand le substratum nutritif a une réaction acide, la décomposition est surtout l'œuvre des Hyphomycètes qui ont un pouvoir oxydant extraordinaire. A leur place on voit apparaître les Schizomycètes dès que le milieu présente une réaction alcaline. Ceux-ci interviennent principalement, sinon exclusivement, dans la putréfaction et dans toute une série de fermentations qui s'accomplissent en l'absence de l'air.

En opposition avec les *parasites* qui ne vivent qu'aux dépens d'êtres vivants plus élevés en organisation, tous les organismes dont il vient d'être question ne peuvent croître que sur des matières mortes ; depuis 1866 on les désigne sous le nom de *saprophytes*.

CHAPITRE III

ACTION DES ANIMAUX

De nombreux animaux contribuent certainement à la décomposition des matières organiques ; partout où elles existent en assez grandes quantités (terre, marais, couverture des forêts, fumier, etc.), des animaux se rencontrent en plus ou moins grand nombre et souvent en masse. Ce sont des Rhizopodes, des Anguillules (Nématodes), des Lombrics (vers de terre), des Crustacés, des Mollusques, des Myriapodes (*Julus, Polydesmus, Scolopendra, Geophilus*), divers insectes, soit à l'état parfait, soit à l'état de larves.

Ces animaux dilacèrent les débris végétaux et animaux, s'en nourrissent et déposent ensuite leurs excréments dans lesquels les matières se sont déjà partiellement transformées. L'action des animaux est extrêmement variable suivant les circonstances locales ; elle peut être très considérable ou insignifiante.

La dilacération des matières par les animaux ne paraît avoir que peu d'importance d'après les rares recherches faites sur ce sujet. Pour déterminer l'influence que peut avoir sur la décomposition la pulvérisation des débris végétaux par les animaux, P. Kostytscheff[1] mit à décomposer dans des capsules de porcelaine deux lots de feuilles de diverses espèces (chêne, érable, bouleau) dont l'un avait été rongé par les vers de terre et, au bout d'un mois, les deux lots furent placés dans des tubes pour déterminer la quantité d'acide carbonique qui se dégageait dans le même temps.

	Feuilles rongées.	Feuilles non rongées.
Acide carbonique dégagé en 8 jours. .	0,9384	0,8338

1. *Annales agronomiques,* t. XVII, 1891, p. 17-38.

Cette quantité provenait de 75 grammes de matière desséchée.

Dans un deuxième essai KOSTYTSCHEFF fit ronger du *Stipa pennata* par des larves de *Sciara*. La quantité d'acide carbonique qui se dégagea de 75 grammes de matière sèche fut :

	STIPA	
	rongé.	non rongé.
Par jour, en moyenne	0gr,1686	0gr,1698

Des feuilles de chêne (60 gr.) rongées ou non par *Julus terrestris* ont dégagé

	FEUILLES DE CHÊNE	
	rongées.	non rongées.
Acide carbonique	0gr,663	0gr,638

La pulvérisation n'a donc eu qu'une faible influence sur la décomposition des matières organiques.

On connaît plus exactement les modifications que subissent les matières organiques quand elles passent dans l'appareil digestif des animaux terricoles, notamment des vers de terre. La nourriture de ces animaux se compose de matières végétales et animales et de terre[1]. Le suc intestinal des vers est de la même nature que la sécrétion pancréatique des animaux supérieurs et peut, comme elle, émulsionner les graisses, dissoudre les matières albuminoïdes, transformer l'amidon en sucre et même attaquer la cellulose. On peut en conclure *à priori* que les matières organiques absorbées par les vers subissent dans leur passage à travers le tube digestif des transformations chimiques multiples qui les rendent plus facilement décomposables qu'avant. Pour le démontrer, j'ai fait les essais suivants :

De la terre calcaire riche en humus, dont une moitié fut travaillée six mois par les vers de terre et l'autre resta intacte, fut séparée des débris en mélange à l'aide d'un tamis dont les mailles avaient 2 millimètres. On fit en même temps une seconde expérience avec

1. Ch DARWIN, *Die Bildung der Ackererde durch die Thätigkeit der Würmer*, Stuttgart, 1882 ; consulter aussi V. HENSEN, *Zeitschrift fur Wissenschaftliche Zoologie*, 28e vol, 1877, p. 361, et *Landw. Jahrbücher*, par H. THIEL, vol. XI, 1882.

de la terre arable riche en humus qui fut, après un mélange intime, divisée en deux portions de 1 000 grammes chacune qu'on plaça dans des bocaux. L'un d'eux reçut dix vers de terre. L'expérience dura trois mois pendant lesquels le sol fut arrosé d'eau distillée et l'humidité maintenue au même taux dans les deux vases. A l'automne, les lots furent desséchés au soleil après qu'on eut enlevé les vers de terre, et analysés aussitôt aux points de vue de l'altérabilité des matières organiques et du taux en principes nutritifs solubles[1].

Pour le premier point, 150 grammes de sol séché à l'air furent humectés avec 34 grammes d'eau distillée et placés dans des tubes en U. Ceux-ci plongeaient dans un bain-marie constamment maintenu à 30° par un thermostat Soxhlet. L'acide carbonique qui se forme dans le sol, peut, dans les conditions précédemment décrites, servir à mesurer l'aptitude à la décomposition des matières organiques.

Déterminé suivant la méthode de Pettenkofer, le volume d'acide carbonique contenu dans 1,000 volumes d'air du sol fut :

	1er essai		2e essai	
	avec vers.	sans vers.	avec vers.	sans vers.
A. — (Du 7 au 16 novembre)				
Moyenne de 8 dosages. .	5,43	3,88	8,01	3,08
B. — (Du 19 au 28 novembre)				
Moyenne de 9 dosages. .	3,07	2,52	5,61	1,90

Le dégagement d'acide carbonique est beaucoup plus intense dans le sol muni de vers que dans celui qui n'en a pas, parce que les matières organiques s'altèrent plus facilement dans le premier cas que dans le second. On doit en conclure que la proportion d'éléments nutritifs des plantes qui se forment par décomposition dans la terre garnie de vers est plus grande que dans la terre dépourvue de vers.

Pour déterminer les éléments solubles du sol, on mélangea 500 grammes de la terre en expérience avec 2 litres d'eau distillée soigneusement purifiée, à laquelle on avait ajouté une trace de bi-

1. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik*, par E. Wollny, vol. XIII, 1890, p. 391-395.

chlorure de mercure pour empêcher les transformations qui auraient pu survenir dans les principes azotés (ammoniaque, acide nitrique). Ces 500 grammes restèrent pendant 14 jours dans un lieu modérément chaud et furent souvent remués. Le liquide filtré fut partagé en deux portions, l'une pour le dosage de l'ammoniaque et de l'acide nitrique, l'autre pour celui des principes minéraux dissous.

Les matières azotées ont été dosées par la méthode de W. WILLIAM[1]; les matières minérales, par évaporation de l'extrait du sol et la calcination du résidu. La solution était portée à ébullition avec un peu de magnésie dans un ballon muni d'un serpentin jusqu'à ce qu'il en eût distillé 250 centimètres cubes, dans lesquels on dosait l'ammoniaque avec une solution d'acide sulfurique titré. Le reste, étendu d'eau et versé dans un flacon à large col fermé par un bouchon, demeurait 3 jours au bain-marie à 21-24°; la réduction des nitrates et des nitrites y était obtenue à l'aide d'une pile de cuivre et de zinc. Cette pile consistait en six bandes de zinc en feuille de 10 centimètres de longueur et $3^{cm},5$ de largeur, sur lesquelles, après décapage de la surface, on provoquait un dépôt de cuivre en les plongeant dans une solution de sulfate de cuivre à 3 p. 100. Les lames de zinc, après avoir été lavées à l'eau distillée et séchées, étaient mises dans le flacon de manière à y plonger complètement. Une partie de la solution était distillée après une exposition de 3 jours à une température de 21° à 24°, et dans ce qui était distillé on dosait l'ammoniaque.

Voici le résultat des analyses, exprimé en pour-cent du sol sec :

	Ammoniaque.	Acide nitrique.	AZOTE SOUS FORME			MATIÈRES minérales solubles.
			d'ammoniaque.	d'acide nitrique.	Somme.	
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 101.	p. 100.
A. — Sol avec vers de terre.	0 0200	0.0850	0.01647	0.02204	0.03851	0.08672
Sol sans vers de terre.	0.0036	0.1144	0.00285	0.02966	0.03251	0.03267
B. — Sol avec vers de terre.	0.0140	0 0250	0.01147	0.00648	0.01795	0.15338
Sol sans vers de terre.	0.0060	0.0440	0.00494	0.01141	0.01635	0.03362

1. *Transactions*, 1881, 100.

On voit par ces chiffres que la quantité de matières azotées et minérales solubles est plus grande dans la terre habitée par des vers que dans celle qui n'en possède pas. La première renferme plus d'ammoniaque, mais moins d'acide nitrique que la dernière.

En conséquence, ces recherches prouvent que la richesse du sol en principes nutritifs assimilables est augmentée par l'action des vers de terre. Cela tient à ce que les matières organiques du sol éprouvent, en traversant le tube digestif, sous l'influence des sucs intestinaux, des modifications qui favorisent leur décomposition. Cette action, toutes circonstances égales d'ailleurs, doit être plus accusée dans le cas où les vers se nourrissent des parties mortes des plantes (feuilles, tiges, racines, etc.).

En second lieu, les vers influent snr la fertilité du sol en contribuant essentiellement à sa porosité et à sa mise en grumeaux, abstraction faite des nombreux trous qu'ils y creusent. Pour le démontrer, j'ai rempli d'un sol arable humique, humide, finement tamisé, deux vases cylindriques en tôle de zinc de 8^{cm},6 de diamètre et 4 centimètres de hauteur et dans l'un j'ai mis cinq vers de terre. Après avoir égalisé la surface j'ai saupoudré chaque vase du même sol pour empêcher l'évaporation et la sortie des vers. Au bout de six semaines, la terre peuplée de vers non seulement était complètement mise en grumeaux, mais encore avait augmenté notablement de volume.

Les chiffres suivants précisent les modifications survenues :

TERRE.	DIAMÈTRE du cylindre.	HAUTEUR du sol.	VOLUME du sol.	AUGMENTATION de volume absolue.	AUGMENTATION de volume p. 100.
—	—	—	—	—	—
	centim.	centim.	cent. cub.	cent. cub.	
Avec vers . .	8,6	5,1	296,24	63,9	27.5
Sans vers. . .	8,6	4,0	232,34		

Afin de déterminer la capacité du sol pour l'air et l'eau, deux tubes de 5 centimètres de diamètre et de 35 centimètres de longueur furent remplis sur 30 centimètres avec un même poids de lehm humide. Dans l'un on mit 6 vers de terre au moment du remplissage. Après deux mois de séjour au laboratoire, la terre garnie de vers était à l'état grumeleux et avait subi une augmentation de volume de 6.9 p. 100. Alors on ajouta de l'eau par le dessus aux deux vases

jusqu'à ce que des gouttes s'écoulassent de la partie inférieure fermée par une toile métallique, puis on laissa les vases en repos et couverts pendant 48 heures pour enlever l'excès d'eau. Ensuite on prit la terre dans les deux vases sur une hauteur de 30 centimètres, on la pesa après avoir ôté les vers, et on la dessécha pour la repeser encore. Connaissant le poids spécifique de la terre, on déduisit de ces pesées le volume du sol et sa capacité pour l'air et l'eau.

Voici les résultats :

FACULTÉ D'IMBIBITION.	SOL avec vers.	SOL sans vers.
Pour 100 en volume.	28.69	48.13
Pour 100 en poids	21.36	29.89

VOLUME.	SOL avec vers.	SOL sans vers.	SOL avec vers.	SOL sans vers.
	cent. cub.	cent. cub.	p. 100.	p. 100.
Air.	183,5	52,7	31.2	8.9
Sol.	236,5	252,8	40.2	42.9
Eau	169,0	283,5	28.6	48.2
Total . . .	589,0	589,0	100.0	100.0

Grâce à la mise en grumeaux du sol par les vers de terre, la faculté d'imbibition est diminuée, mais le volume de l'air occlus est augmenté.

Étant donné que les vides non capillaires sont multipliés et agrandis par l'état grumeleux du sol, il n'y a rien d'étonnant à ce que la perméabilité pour l'air et l'eau soit sensiblement plus grande dans le sol pourvu de vers que dans l'autre. Pour le prouver, on remplit deux tubes de tôle de 5 centimètres de diamètre et de 35 centimètres de longueur fermés en bas par une fine toile métallique, avec du sable calcaire humide et riche en humus; l'un reçut 10 vers de terre. De mai en octobre les tubes restèrent verticaux, recouverts par une plaque de verre. Dans le dernier mois on fit passer de l'air à travers les deux tubes sous une pression de 40 millimètres d'eau et le volume d'air fut mesuré à l'aide du gazomètre. La quantité de litres d'air qui traversa le sol fut, par heure, de 432,27 (1er essai) et de 428,98 (2e essai) pour le sol peuplé de vers et de 3,65 (1er essai), 3,51 (3e essai) pour le sol sans vers de terre.

Dans les mêmes tubes on détermina ensuite la faculté d'imbibition par la méthode de WELITSCHKOWSKY[1]. La quantité d'eau exigée pendant dix heures pour maintenir à la surface du sol une lame constante de 50 centimètres fut de 74 000 centimètres cubes pour le sol habité par les vers et de 2 930 pour l'autre.

A la fin de l'expérience, les tubes furent vidés et l'on constata que tous les vers de terre étaient encore en vie, quoique le sol fût de mai en octobre devenu presque aussi sec qu'il peut le devenir à l'air, fait qui montre, de la façon la plus frappante, la puissance de résistance des vers aux circonstances extérieures défavorables.

Un autre essai fut fait dans les mêmes conditions avec du lehm.

La quantité de litres d'air qui traversa le sol fut, par heure, de 464,51 en moyenne (463,26 — 1er essai ; 465,46 — 2e essai) pour le sol renfermant des vers de terre et de 181,96 en moyenne (180,53 — 1er essai ; 183,39 — 2e essai) pour le sol dépourvu de lombrics.

Il résulte avec évidence de ces chiffres que l'état mécanique du sol est modifié par les vers de terre dans un sens favorable à la croissance des végétaux, parce qu'ils provoquent la formation des grumeaux du sol et le rendent plus facilement perméable à l'air et à l'eau. L'importance de ce fait frappe encore davantage si l'on considère que c'est précisément dans ces localités où les vers existent en abondance (stations humides) qu'une plus forte proportion d'air coïncidant avec une diminution correspondante dans la faculté d'imbibition est très utile pour la décomposition normale des matières organiques (érémacausis).

L'influence des animaux sur la destruction de ces substances et la formation de l'humus paraît être beaucoup plus active dans les pays chauds que dans la zone tempérée. Ainsi C. KELLER[2] rapporte qu'à Madagascar les vers de terre et le *Geophagus Darwinii* déploient une activité extraordinaire, si bien que la terre rejetée par les vers atteindrait annuellement en chiffres ronds la somme de 1 mil-

---

1. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik,* vol. X, 1887, p. 203.

2. C. KELLER, *Humusbildung und Bodencultur unter dem Einfluss thierischer Thätigkeit.* Leipzig, 1887.

V. aussi P. E. MULLER, *Studien über die natürlichen Humusformen.* Berlin, 1887.

liard et demi de mètres cubes. A l'île de la Réunion, d'après le même auteur, le travail des vers de terre n'est pas si frappant qu'à Madagascar; mais, par contre, les Julides (*Julus corallinus*) doivent avoir une grande part à la formation de l'humus. Celui-ci, du reste, se trouve déjà tout préparé, sous les tropiques, dans une large mesure, à la surface du sol, surtout par les fourmis qui attaquent les arbres vaincus par leurs concurrents dans la lutte pour l'air et la lumière, les transforment en humus et fournissent ainsi au sol de nouvelles sources d'alimentation.

D'après C. Keller, c'est aux crustacés que revient la première place dans la formation de l'humus sur les récifs de coraux et sur les plages.

Enfin, n'oublions pas de rappeler que les animaux plus élevés en organisation qui vivent dans le sol lui donnent en fouissant et creusant leurs galeries une perméabilité qui active la décomposition des matières organiques.

CHAPITRE IV

MORPHOLOGIE DES MICROORGANISMES

Les organismes inférieurs qui ont été trouvés jusqu'ici dans les restes animaux ou végétaux en train de s'altérer et qui interviennent, soit directement, soit indirectement, dans leurs processus de décomposition, se rangent très naturellement en trois groupes principaux :

Le premier comprenant les Hyphomycètes (champignons proprement dits ou *Fungi*) ;

Le second, les Blastomycètes (*Levures*) ;

Le troisième, les Schizomycètes (*Bactériacées*)[1].

Un quatrième groupe, celui des Myxomycètes, est sans grande importance au point de vue qui nous occupe[2].

---

1. Pour la rédaction de ce chapitre, on a utilisé surtout les ouvrages suivants :

C. v. Nägeli, *Die niederen Pilze*. München, 1877.

A. de Bary, *Vorlesungen über Bacterien*. Leipzig, 1885.

A. de Bary, *Vergleichende Morphologie und Biologie der Pilze, Mycetozoen und Bacterien*. Leipzig, 1884.

O. Brefeld, *Botanische Untersuchungen über Schimmelpilze*, I-IV.

C. Flügge, *Die Mikroorganismen*. Leipzig, 1886.

W. Zopf, *Die Spaltpilze*. Leipzig, 1885.

W. Zopf, *Die Pilze in morphologischer, physiologischer, biologischer und systematischer Beziehung*. Breslau, 1890.

E. Kramer, *Die Bacteriologie in ihren Beziehungen zur Landwirtschaft*. Wien, 1890.

C. Frankel, *Grundriss der Bacterienkunde*. Berlin, 1890.

C. Guenther, *Einführung in das Studium der Bacteriologie*. Leipzig, 1891.

J. Eisenberg, *Bacteriologische Diagnostik*. Hamburg und Leipzig, 1891.

2. A. de Bary, *Vergleichende Morphologie und Biologie der Pilze, etc.* Leipzig, 1884, p. 453.

1. — Hyphomycètes.

Les Champignons proprement dits ou Hyphomycètes se composent tout d'abord de filaments fins (hyphes) richement ramifiés, répandus dans le substratum ou s'élevant en partie au-dessus. Ils ont la forme cylindrique et se divisent par des parois transversales en cellules longuement étirées munies d'une membrane tendre, sans structure, et d'un contenu protoplasmique. Ce dernier remplit uniformément la cellule ou bien se creuse de vacuoles remplies d'eau et d'autant plus nombreuses que la cellule est plus âgée. La croissance des hyphes est terminale ; le sommet progresse constamment, puis, à une certaine distance de lui, se forment successivement de nouvelles parois transversales ; les choses se passent de même pour les ramifications qui naissent par bourgeonnement latéral.

L'ensemble des filaments s'appelle le thalle.

Les hyphes répandus dans le substratum sont les organes destinés à absorber les matières nutritives et à les rendre assimilables ; ils constituent le mycélium. Celui-ci est de consistance floconneuse ou forme chez beaucoup d'espèces des lames parenchymateuses ou des cordons fibreux ou encore, dans certaines circonstances, des renflements globuleux qu'on appelle sclérotes.

Sur les filaments qui proéminent à la surface du mycélium (filaments fructifères) et qui forment des corps reproducteurs, quand ils sont nombreux et serrés, se développent, et de façons bien diverses, les organes de reproduction du champignon, les spores. Sous ce rapport comme sous celui de la dissémination des spores, on distingue :

a) Des formations intercalaires : sur les hyphes en croissance se séparent certaines cellules qui ont une forme spéciale et se transforment en spores ou en cellules-mères des spores. Ces productions s'appellent souvent des *gemmes ;*

b) Des formations acrogènes, celles où les hyphes fructifères se divisent par des cloisons transversales et fonctionnent comme spores. Les pédicelles minces naissant chez beaucoup d'espèces à l'extré-

mité des cellules fructifères (basides) et supportant les spores s'appellent des stérigmates. Il se sépare une seule spore par formation d'une cloison transversale, ou plusieurs naissent en chapelet. La mise en liberté des spores a lieu soit par destruction des supports, soit par leur étranglement, soit par projection. Les spores qui se forment de cette manière s'appellent basidiospores, acrospores ou conidies;

c) Des formations endogènes, quand les spores naissent à l'intérieur de cellules-mères dont la paroi persiste, comme sporange, jusqu'à la maturité des spores. Ces cellules-mères sont le plus souvent acrogènes. Les spores y naissent par partition du protoplasma sans cloisonnement préalable.

Quand les sporanges sont utriculaires ou claviformes, on les appelle *asques;* ces asques contiennent en général huit ascospores. Ils se forment souvent au fond de petits réceptacles fructifères globuleux ou elliptiques (périthèces).

Les spores sont mises en liberté par l'ouverture ou la gélification du sporange ou bien encore une grande partie du contenu est projetée avec force par une fente en entraînant les spores (éjaculation);

d) Souvent il y a une sorte de fécondation sexuée qui précède la formation des spores. Elle consiste soit en ce qu'on nomme copulation où deux hyphes développent deux protubérances opposées qui se touchent et, après résorption de la membrane séparative, forment une zygospore, soit dans la production d'organes spéciaux, l'un mâle, l'autre femelle. Ce dernier (oogone) est installé en forme de grosse cellule sphérique sur un filament mycélien. L'organe mâle ou anthéridie consiste en une grosse cellule claviforme qui se colle à l'oogone en se séparant par une cloison de son hyphe de support ou qui pousse dans l'intérieur de l'oogone un tube fécondateur. Après la fécondation, il se forme dans l'oogone des spores rondes pourvues d'une membrane (oospores).

Les spores sont des cellules ordinairement simples, parfois composées, de formes diverses (globuleuses, ovales, en bâtonnet), dont la membrane comprend une couche externe (épispore) et une couche interne (endospore) et dont le contenu est du protoplasma renfer-

mant des gouttes d'huile. Elles servent à la multiplication du champignon en développant sur un substratum approprié un ou plusieurs tubes germinatifs dont naîtra le mycélium. Parfois la spore se transforme en cellule-mère de nouvelles spores (sporange).

Pour le but qu'on se propose ici, il suffira de décrire quelques-uns des champignons les plus répandus dans le sol et dans les débris végétaux ou animaux en décomposition.

a) *Mucor.*

Les Mucorinées sont très largement répandues et forment sur les matières en décomposition des revêtements blancs ou bruns consistant en un mycélium tendre fortement ramifié (fig. 1, 3) et en filaments fructifères verticaux (3, *b*) terminés par un sporange globuleux (3, *c*, et 4). La cloison de base de ce sporange fait hernie dans l'intérieur en forme d'un tube conique qu'on appelle la columelle (4, *b*). La membrane du sporange (4, *c*) est hérissée de pointes cristallines d'oxalate de chaux. Dans la formation des spores (4, *d*) une partie du protoplasma reste inutilisée et se transforme par la suite en ce qu'on appelle la matière interstitielle, masse gélatineuse se gonflant fortement dans l'eau. La membrane sporangiale revêtue d'une croûte calcaire est de la cellulose modifiée qui se gonfle aussi beaucoup dans l'eau et, agissant dans le même sens que la matière interstitielle, fait éclater la croûte calcaire et projette les spores.

Dans beaucoup d'espèces, on a constaté des bourgeons sur le mycélium et même sur les tubes sporangifères ; ils se forment d'ordinaire quand le substratum est épuisé. Dans les dissolutions sucrées les spores de certaines espèces développent un mycélium agissant comme ferment (*M. racemosus, circinelloides, erectus, spinosus, fragilis, Mucedo*).

M. Mucedo L. (fig. 1) est une des mucorinées les plus répandues et se rencontre sur toutes les substances albuminoïdes.

Les hyphes fructifères incolores ont une longueur de 1 à 13 centimètres. Les sporanges vont du jaune-brun au noir et leur membrane est lisse ou garnie de pointes serrées d'oxalate de chaux. Les spores

sont ellipsoïdes avec une membrane hyaline sans sculpture et un contenu jaunâtre : longueur = 7-11 μ., largeur = 4-6 μ.

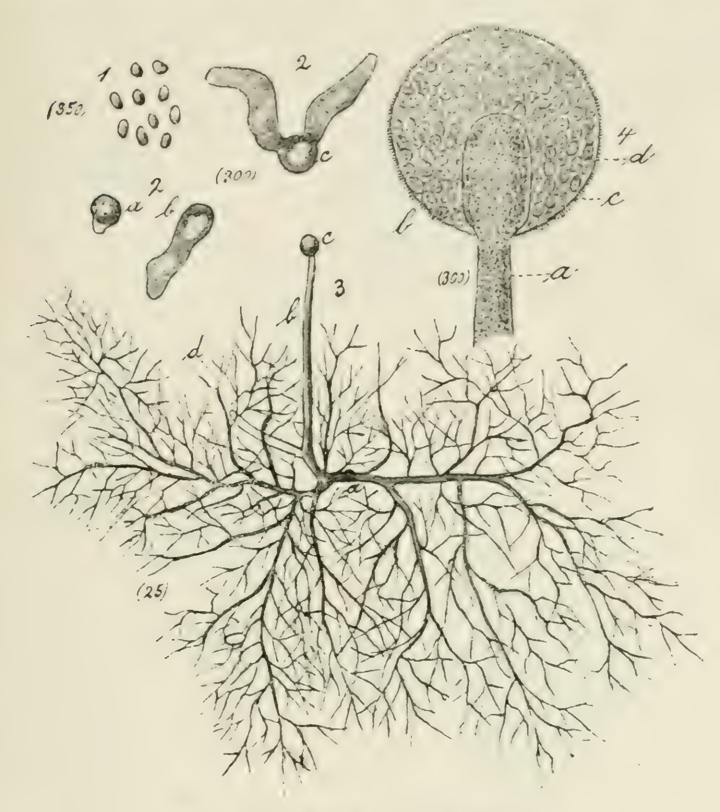


Fig. 1. — *Mucor Mucedo* L. (d'après Brefeld)[1].

1. Spores. — 2. Germination des spores : *a*, distension de la spore ; *b* et *c*, développement du tube germinatif. — 3. Mycélium provenant de la spore *a* : *b*, tube sporangifère terminé par le sporange *c* ; *d*, tube sporangifère en formation. — 4. Tube sporangifère : *a*, avec sporange ; *b*, columelle ; *c*, membrane du sporange ; *d*, amas des spores.

Dans les excréments on trouve de-ci de-là, dit Brefeld, des zygospores qui atteignent un volume considérable (fig. 2).

M. racemosus Fresenius est surtout répandu sur les substances riches en hydrates de carbone. Les hyphes fructifères sont généralement ramifiés, plus ténus et plus courts que dans l'espèce précé-

1. Les nombres mis entre parenthèses dans les figures expriment le grossissement linéaire.

dente. Les sporanges globuleux ont 30-34 μ de diamètre ; ils vont du jaunâtre au brun clair. Les spores, ellipsoïdes ou sphériques, incolores et sans sculpture, ont 5-8 μ de long et 4-5 μ de large.

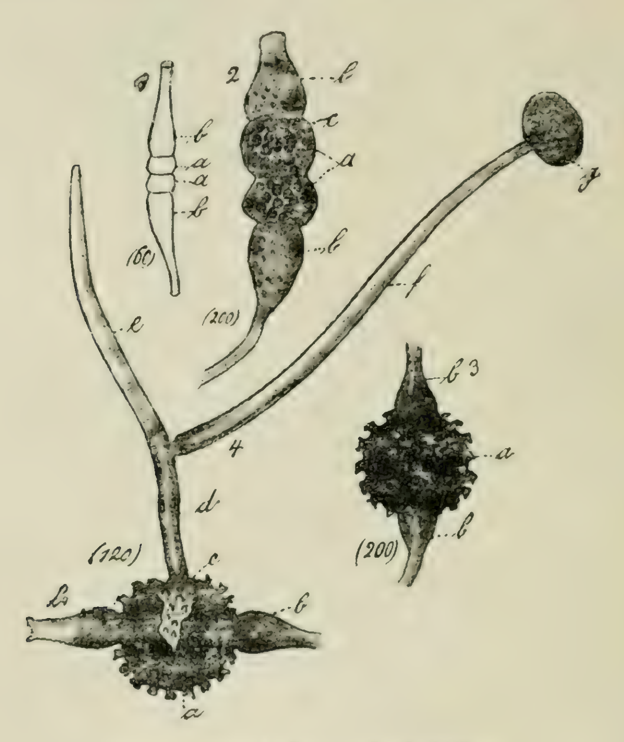


FIG. 2. — *Mucor Mucedo* L. (d'après BREFELD).

1 représente la première phase de la conjugaison ; *b b*, les deux rameaux de conjugaison dont les cellules qui doivent former l'œuf *a a* sont déjà séparées. — 2. État plus avancé : *a*, fusion des cellules, grossissement de l'œuf, sur lequel on voit nettement les épaississements verruqueux *c* ; *b b*, les deux suspenseurs. — 3. Zygospore mûre *a*, avec ses deux suspenseurs *b b*. — 4. Zygospore germant après éclatement de l'exospore ; *a*, zygospore ; *b b*, suspenseurs ; *c*, endospore poussant son tube germinatif *d*, dont le premier filament *e* reste stérile ; une branche latérale *f* s'en sépare par une cloison et porte un sporange *g*.

Sur les vieux mycéliums on trouve d'ordinaire un abondant bourgeonnement intercalaire et terminal (fig. 3, 3-5). Ces cellules de bourgeonnement développent dans des circonstances favorables des myceliums qui, maintenus dans l'air humide, donnent de très petits tubes sporangifères avec de minuscules sporanges. Dans des solutions nutritives sucrées, sur les tubes germinatifs développés soit par

les gemmes, soit par les spores et qui, dans ces conditions, sont très

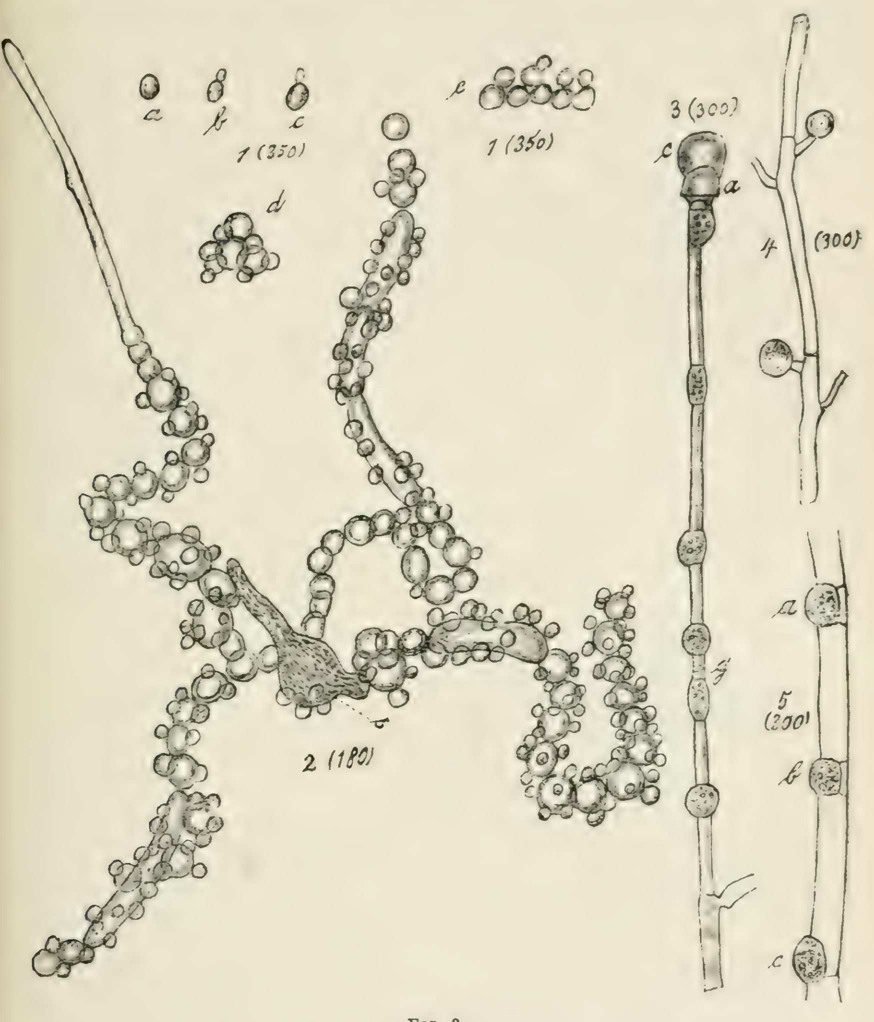


Fig. 3.

1. *a-e*, développement du mycélium de *Mucor racemosus* dans une décoction de jus de pruneaux, à partir de la spore *a*, en bourgeons courts, globuleux. — 2. Mycélium de *Mucor racemosus* provenant de la spore *s* dans une solution sucrée étendue; ce mycélium est formé de cellules en tonnelets munies d'articles bourgeonnants globuleux. — 3-5. Formation des bourgeons chez le *Mucor racemosus*. — 3. Filament sporangifère avec six bourgeons *g*. — 4. Filament mycélien avec deux courts rameaux latéraux terminés chacun par un bourgeon globuleux. — 5. Filament mycélien avec trois bourgeons intercalaires. (D'après Zopf.)

courts, il se produit des cellules en forme de levures (fig. 3) qui

provoquent aisément la fermentation alcoolique. Les bulles d'acide carbonique qui se dégagent portent bientôt à la surface les cellules de levure, où elles constituent alors un mycélium normal. Ce pro-

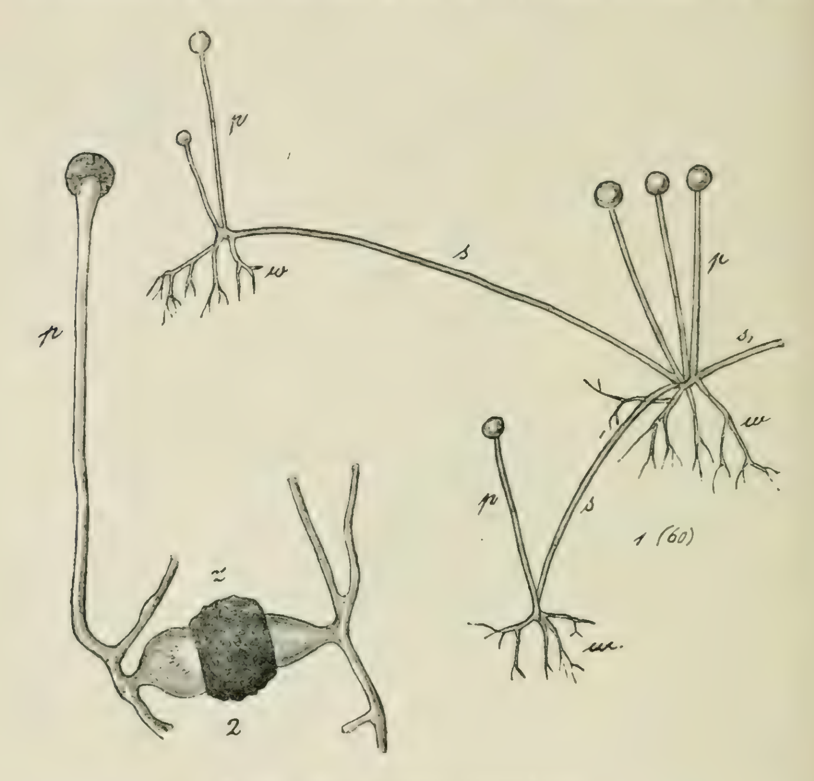


FIG. 4. — *Mucor stolonifer* (d'après DE BARY).

1. *s*, extrémité du stolon; *ss*, deux stolons de second ordre; *p*, tubes sporangifères; *w*, rameaux radicellaires (un peu grossis). — 2. *z*, zygospore avec ses suspenseurs d'où naît un tube sporangifère *p*, dont le sporange est dessiné schématiquement en coupe longitudinale.

cessus paraît donc être un moyen pour le champignon de revenir à ses conditions biologiques normales.

M. stolonifer (*Rhizopus nigricans* EHR.) [fig. 4]. Du mycélium naissent des tubes simples, arqués, qui s'inclinent bientôt à l'extrémité et ressemblent aux stolons des plantes supérieures; ils se fixent à leur extrémité en développant de courts rameaux radicellaires en rosette qui pénètrent solidement dans le substratum. Des points où se trouvent ces sortes de crampons s'élèvent deux ou plu-

sieurs tubes sporangifères portant à leur extrémité les sporanges globuleux (fig. 4, 1). De chaque rosette s'élancent à nouveau 1-2 stolons qui se comportent comme les précédents. Il se forme ainsi tout un système de stolons, de crampons et de groupes de sporanges.

Les sporanges sont noirs et verruqueux, les spores brunâtres et presque sphériques, de 10-20 μ de diamètre.

Le champignon forme aussi des zygospores (fig. 4, 2) de la même manière que le *M. Mucedo*. La zygospore, en forme de boule ou de tonneau, possède une enveloppe très épaisse formée de plusieurs couches dont l'extérieure est grossièrement verruqueuse. A la maturité, c'est une cellule noire, remplie d'un protoplasma épais, riche en matières grasses, et placée entre deux suspenseurs qui s'accroissent en même temps et finalement se dessèchent. Ces mêmes filaments qui forment les zygospores portent souvent, en outre, des groupes de tubes sporangifères.

Les autres espèces de mucorinées n'offrent plus aucun intérêt à notre point de vue à cause de leur rareté.

b) *Aspergillus*.

Les filaments conidifères qui surmontent le mycélium sont habituellement unicellulaires, de $0^{mm},5$-$1^{mm},5$ de longueur et renflés en tête à leur extrémité. Sur cette tête naissent de nombreux petits stérigmates claviformes disposés en ombelle et dont l'extrémité produit une succession de conidies rondes ou un peu ovales, 1-6 μ de diamètre.

Dans beaucoup d'espèces, ce mycélium, qui forme les filaments conidifères, produit normalement un périthèce dont la formation tantôt ne subit pas d'arrêt, tantôt passe par une phase de repos sclérotique pour s'achever plus tard.

Les périthèces débutent par une bifurcation ténue, indistincte à l'œil nu, qui, après un allongement bientôt terminé, s'enroule en tire-bouchon sur 4-6 spires en général. Les spires se rapprochent de plus en plus jusqu'à ce qu'elles se touchent, si bien que la partie terminale se transforme en une vis creuse. Il se passe alors dans et

sur ce corps spiralé des modifications compliquées dont la description serait trop longue et dont il ressort seulement qu'elles sont un processus de conjugaison sexuelle. A la suite de ces transformations, le corps spiralé donne rapidement naissance à un périthèce globuleux formé d'une paroi mince (une seule assise de cellules délicates) et d'une masse épaisse de cellules solidement reliées. Par le grossis-

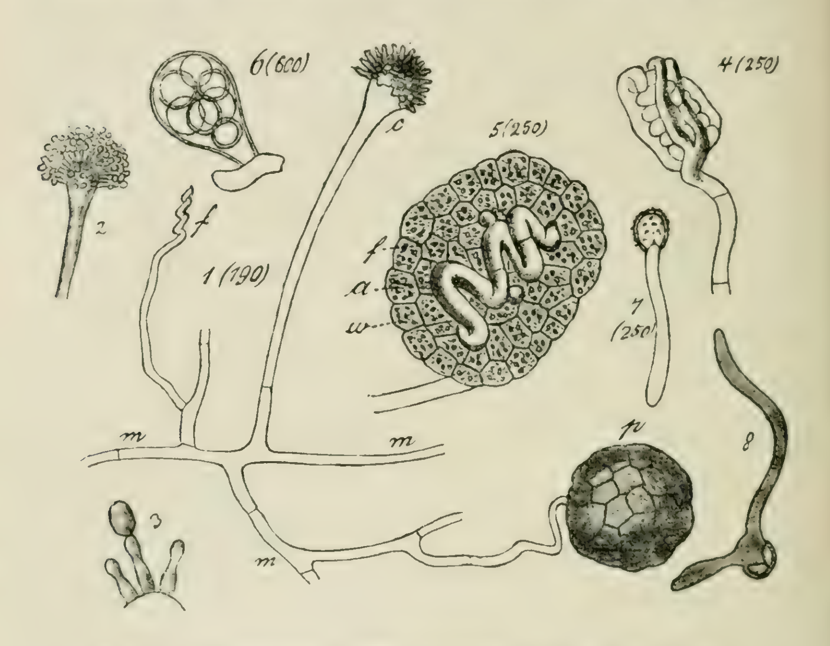


FIG. 5. — Développement de l'*Aspergillus glaucus* (d'après DE BARY et ZOPF).

1. *mm*, filaments mycéliens ; *c*, filament conidifère dont les conidies sont tombées ; *p*, périthèce ; *f*, ébauche d'un périthèce. — 2-3. Filaments conidifères avec leurs basides et leurs conidies. — 3. Plus fortement grossis. — 4. Ascogone entouré par les pollinodes. — 5. Jeune périthèce (coupe longitudinale) ; *w*, assise qui donnera la paroi ; *f*, tissu de remplissage ; *a*, ascogone. — 6. Une asque avec ses spores. — 7. Conidie en germination. — 8. Ascospore en germination.

sement de ces diverses régions, ce tubercule croît assez pour être à la maturité nettement visible à l'œil nu. La surface externe de son enveloppe acquiert une assez grande solidité et une teinte d'un jaune vif. Les cellules internes deviennent pour la plupart des asques en s'isolant des cellules voisines, en prenant une forme largement ovalaire ; chacune contient huit spores qui remplissent aussitôt toute la cavité de l'asque. A la maturité, sa paroi se dissout, celle du périthèce

se rompt et par les fentes irrégulières qui s'y produisent les ascospores rondes et toujours incolores sont mises en liberté.

Aspergillus glaucus DE BARY (fig. 5). Se présente sous forme de revêtement floconneux, d'abord d'un blanc pur, se recouvrant peu à peu d'un bout à l'autre de petits capitules finement pédicellés gris ou noirs. Conidies rondes, verruqueuses ou rugueuses, de 9-15 μ de diamètre. Très commun.

Aspergillus flavus DE BARY. Masse des spores d'un beau jaune d'or, jaune verdâtre, ou brunâtre. Conidies globuleuses, de 5-7 μ de diamètre, avec une endospore finement verruqueuse. Forme des sclérotes tuberculeux, noirs, jaune rougeâtre sur la surface de section et mesurant environ $0^{mm},7$. Peu abondant.

Aspergillus niger VAN TIEGHEM. Filaments conidifères ayant parfois plus d'un millimètre de haut avec des capitules d'un noir brun et des conidies rondes de 3-5 à 4-5 μ, à épispore verruqueuse, d'un violet brun. Forme des sclérotes globuleux ou cylindriques, d'un jaune brun ou d'un rouge brunâtre, mesurant $0^{mm},5$-$1^{mm},5$. Assez rare.

c) *Penicillium.*

Le filament fructifère est cloisonné et se divise à son extrémité en courts rameaux. Au bout du filament principal comme à celui des branches latérales naissent des basides sur les stérigmates desquelles les conidies se forment en chapelet. Au-dessous de ces basides, il peut s'en produire d'autres de la même manière, si bien que l'ensemble des conidies affecte la forme de pinceaux. On n'a trouvé de périthèces que chez peu d'espèces, par exemple chez le *P. glaucum*, où, d'après BREFELD, ils passent toujours par la phase de sclérote.

Penicillium glaucum LINK (fig. 6 à 8). Moisissure la plus répandue, se développant sur les substances les plus diverses en revêtements floconneux, d'abord blancs, puis glauques. Le diamètre des spores est d'environ 3,5 μ. Les formes rabougries ne développent qu'un filament à l'extrémité duquel s'allonge un seul chapelet de conidies ; avec une végétation plus vigoureuse il se forme un plus grand nombre d'hyphes fructifères rapprochés en un faisceau épais (*Coremium*) ; à l'extrémité de ces filaments se développent, dans la

manière indiquée, des chaînes de conidies. Le périthèce affecte d'abord la forme de sclérotes qui, après une certaine période de repos, produisent des asques dont les spores, ellipsoïdales dans leur contour, sont en même temps anguleuses et épaissies à l'exception d'une ligne longitudinale médiane ; elles ont 5-6 μ de long, 4-4,5 μ de large.

D'après Brefeld, le sclérote naît de la façon suivante : Sur un

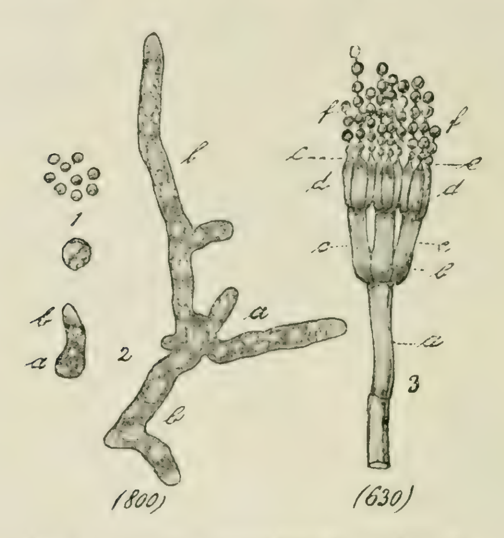


Fig. 6. — *Penicillium glaucum* Link (d'après Brefeld).

1. Spores. — 2. Germination d'une spore : *a*, spore ; *b*, tube germinatif. — 3. Fructifications : *a*, filament fructifère ; *b*, cellule terminale ; *c*, rameaux latéraux ; *e*, stérigmates supportant des chapelets de spores, *f*.

filament mycélien il se forme un ascogone en spirale (fig. 7, 1) qui est bientôt recouvert par des filaments adventifs naissant de la base et du mycélium et s'agglomérant plus tard avec leurs ramifications en une pelote serrée. Tandis que cette enveloppe allonge et épaissit ses éléments périphériques, se constituant ainsi en un corps dur, l'ascogone grandit, se ramifie et ses branches pénètrent en tous sens dans le tissu médian formé de cellules à parois moins épaisses (fig. 7, 2-3).

Quand on place les sclérotes mûrs sur du papier à filtre humide les filaments de l'ascogone se développent, se ramifient, poussent

d'épais rameaux latéraux dont les branches deviennent finalement des asques (fig. 7, 4-5). En même temps se sont développés de fins et minces filaments, branches latérales des hyphes de l'ascogone, qui

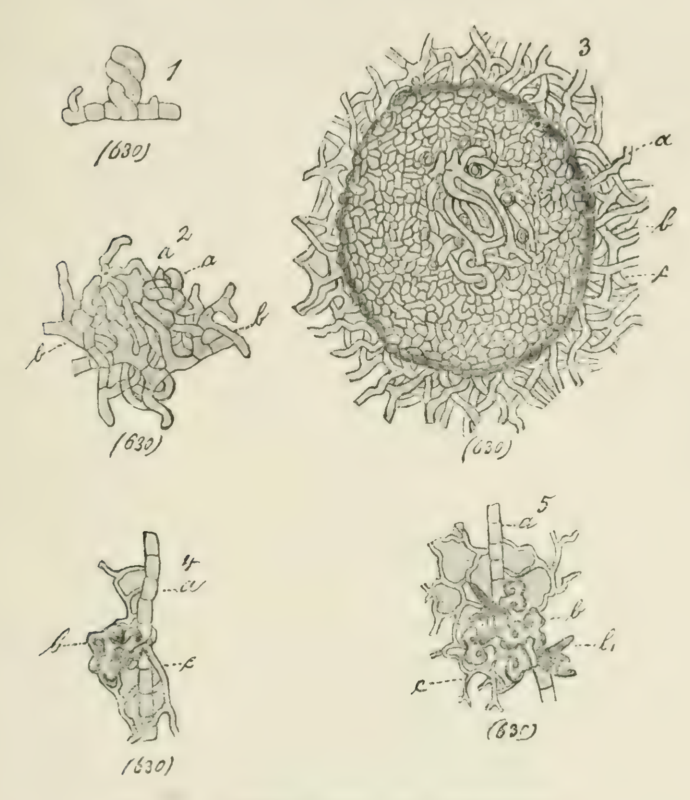


Fig. 7. — *Penicillium glaucum* Link (d'après Brefeld).

1. Organes sexuels contournés en spirale et qui se sont probablement fécondés ; l'ascogone et le pollinode proviennent d'un hyphe épais qui s'est divisé. — 2. Les mêmes au début de la formation du fruit; *a*, ascogone se développant; *b*, filaments stériles en train de le recouvrir. —3. Jeune fruit (sclérote) : *a*, ascogone ; *b*, tissu stérile intérieur ; *c*, tissu stérile extérieur. — 4. Ascogone plus développé : *a*, filament de l'ascogone; *b*, son bourgeon qui doit produire les asques; *c*, hyphes. — 5. État plus avancé (mêmes lettres que 4).

pénètrent dans le tissu stérile et amènent sa dissolution. Ces filaments fins apportent aux hyphes de l'ascogone les éléments nutritifs empruntés à ce tissu stérile. La dissolution finit par progresser au point qu'il ne reste plus que l'écorce périphérique, l'intérieur étant entièrement rempli par la masse des spores.

Zukal est arrivé dans ses recherches à des résultats essentiellement différents, tant sur la naissance du sclérote que sur les filaments de l'ascogone

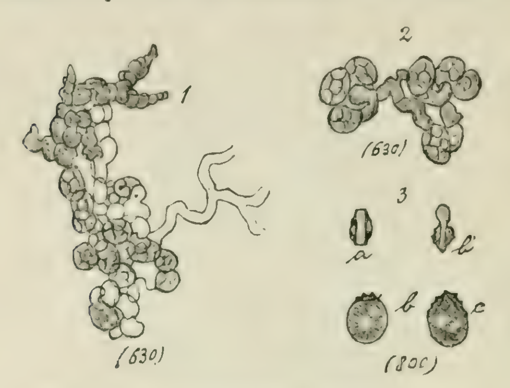


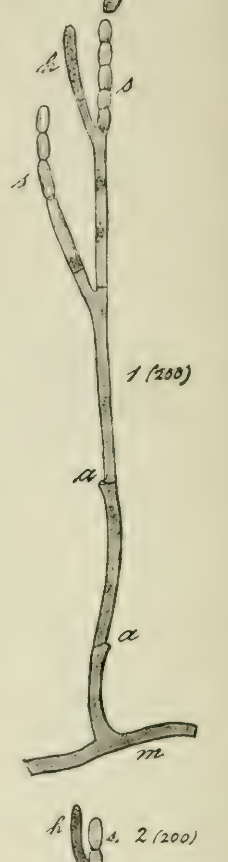
Fig. 8. — *Penicillium glaucum* Link (d'après Brefeld).

1. Sommet d'un filament ascophore. Fragment d'un filament en fructification dont les branches latérales ascophores sont mûres et en partie tombées. — 3. Ascospores vues de côté; *b* et *c*, germination.

qui, d'après lui, ne proviennent pas d'un seul, mais de plusieurs organes initiaux.

d) *Erysiphe* (*Oidium*).

Les *Erysiphe* s'installent d'ordinaire sur les plantes vivantes et y forment le tapis de moisissure connu sous le nom de *Blanc*[1]; il n'y a à citer ici comme saprophyte que l'*Oidium lactis*. On désigne sous le nom d'oïdium la forme conidienne des *Erysiphe*.



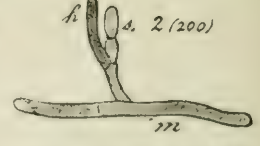


Fig. 9. — *Oidium lactis* Fres. (d'après Flügge).

1. Hyphe fructifère vieux. — 2. Plus jeune : *m*, mycélium; *s*, chapelet de spores à côté duquel l'hyphe fructifère *h* se forme par ramification; *a*, supports des anciennes spores.

L'*Oidium lactis* Fres. (fig. 9) est extraordinairement répandu; il est particulièrement abondant sur le lait acide, les excréments animaux, le fumier et dans le sol (Adametz). Il forme des filaments solides, ramifiés dans un plan horizontal d'où s'élèvent les conidiophores. Ceux-ci, après avoir atteint une certaine longueur, cessent

1. Le nom vulgaire allemand est *Mehlthau* (rosée de farine).

de croître et, dans toute leur étendue, sauf à leur base, se divisent en une rangée d'articles cylindriques une fois ou deux aussi longs que larges. Chacun représente une conidie. Bientôt après leur ébauche, elles se séparent, d'abord incomplètement, de sorte que le chapelet fait des zigzags, puis elles s'isolent entièrement. De temps en temps apparaît une ramification, tandis que l'hyphe fructifère continue à croître vers le haut à côté de la chaîne de spores qui vient de se former. Les spores ont 7,7-10,8 μ. Sur un substratum convenable, elles germent vite et donnent aussitôt naissance à un mycélium qui produit à nouveau ces mêmes conidies. Les périthèces ne sont pas encore connus. C'est pourquoi l'attribution de cette forme oïdium à une espèce déterminée de champignons n'a pu être faite jusqu'ici, bien qu'on doive l'admettre avec assez de probabilité.

Au groupe des moisissures appartient encore toute une série de formes saprophytes, mais qui ne sont pas aussi généralement répandues que les précédentes et ne se rencontrent que sur certains substratums.

Parmi les champignons habitant les excréments citons :

Pilobolus cristallinus Tode, *Mortierella Rostafinskii* Brefeld, *Coprinus stercorarius* Bulliard, *Sordaria minuta* Fuckel, *S. Brefeldii* Zukal, *S. curvula* de Bary, *S. decipiens* Winter, *S. pleiospora, S. Wiesneri*, etc., *Thamnidium elegans* Link, *Ascobolus pulcherrimus* Crouan, *A. denudatus* Fr., *A. furfuraceus* Persoon, *Syncephalis cordata* Van Tieghem et Le Monnier, *Ascodesmis nigricans* Van Tieghem, diverses espèces de *Saccobolus*[1].

Les parties mortes des plantes sont aussi habitées par de nombreuses espèces de champignons, ainsi que les insectes morts, les vers, etc.

2. — Levures.

Les Levures ou *Saccharomyces* consistent en petites cellules microscopiques, se multipliant par bourgeonnement. La membrane se gonfle à une ou aux deux extrémités de la cellule ; ce renflement

1. Voir W. Zopf, *Die Pilze in morphologischer, physiologischer, biologischer und systematischer Beziehung*, Breslau, 1890.

se remplit d'une partie du protoplasma de la cellule-mère ; quand il a pris sa forme et sa grosseur, il se sépare de la cellule-mère par une cloison transversale.

Les levures proprement dites (Saccharomycètes), en dehors de ce thalle bourgeonnant, peuvent, dans certaines conditions, comme l'ont montré les recherches de HANSEN[1], former aussi du vrai mycélium ramifié et, surtout en présence de l'air, se multiplier par formation de spores à l'intérieur de cellules (ascospores). Donc, suivant les circonstances extérieures, la multiplication de ces organismes se fait de deux façons, par bourgeonnement ou par formation de spores.

On n'a pu jusqu'alors arriver à déterminer exactement les espèces qui diffèrent entre elles au point de vue morphologique et biologique, parce qu'on n'avait pas de méthode de culture permettant de séparer sûrement chaque espèce.

Parmi les espèces connues et contribuant à la décomposition des matières organiques dans le sol (d'après ADAMETZ), mentionnons ici :



FIG. 10. — *Saccharomyces cerevisiæ* (d'après HANSEN).

1. Bourgeonnement. — 2. Formation des spores : *a*, première phase ; *b*, ascospores mûres.

Saccharomyces cerevisiæ (levure de bière). Cellules sphériques ou ovales, de 8-9 μ, entourées d'une membrane contenant un protoplasma finement granuleux avec suc cellulaire ; les vacuoles se trouvent surtout dans les cellules adultes. Le noyau cellulaire est relativement gros. Les ascospores, sphériques, fortement réfringentes, ont 2, 5-6 μ. Elles sont au nombre de 2-4, parfois de 5-6 et même d'une seule dans une cellule-mère (fig. 10).

1. E. C. HANSEN, *Recherches sur la morphologie des ferments alcooliques*. Résumé du compte rendu des travaux du laboratoire de Carlsberg. Vol. II, 1886, p. 106.

Saccharomyces ellipsoideus (levure ordinaire du vin). Cellules elliptiques d'environ 6 μ. de longueur, isolées ou en courts chapelets ramifiés. Spores de 3 à 3,5 μ., naissant, comme dans l'espèce précédente, ordinairement à 2-4 dans une cellule-mère. Agent des fermentations spontanées, notamment de celles du moût de vin et par suite universellement répandu (fig. 11).



Fig. 11. *Saccharomyces ellipsoideus* (d'après de Bary).



Fig. 12. *Saccharomyces glutinis* (d'après Cohn).

Saccharomyces glutinis (levure rosée, fig. 12). Cellules globuleuses-ovales ou en cylindres courts ; longueur 5-11 μ. ; largeur 4 μ. ; isolées ou jumellées. Membrane et contenu incolores à l'état frais. Formation des spores inconnue. Forme des revêtements mucilagineux couleur de rose sur les tranches de pommes de terre et sur la gélatine nutritive. Hansen distingue trois espèces de levures rosées dont une forme des ascospores.

On ne sait rien de la présence des autres espèces connues (*Saccharomyces conglomeratus, S. apiculatus, S. sphæricus, S. mycoderma, S. albicans, S. Pastorianus*) sur les matières organiques en décomposition. Il existe, en outre, des formes qui ne sont pas encore bien connues.

Très voisins des *Saccharomycètes* sont encore certains organismes qui se trouvent soit dans l'air, soit dans le sol, sur les débris végétaux en décomposition, sur le fumier de vache, entre autres *Monilia candida* et diverses espèces de *Torula*.

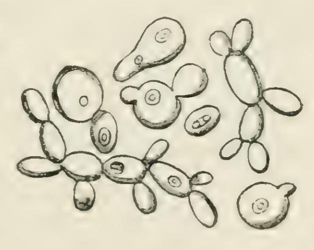


Fig. 13. — *Monilia candida* (d'après Hansen).

Monilia candida Hansen (fig. 13). Thalle bourgeonnant très semblable à celui des *Saccharomyces*. Dans les vacuoles des cellules, on voit un corpuscule mobile fortement réfringent. En présence de l'air, il se forme une peau de moisissures (fleurs) d'un vert mat, formée d'abord d'un thalle bourgeonnant et de cellules isolées et

plus tard, d'un vrai mycélium à croissance terminale sur lequel se produisent des conidies latérales en forme de cellules de levure et des ramifications d'oïdium. *M. candida* fait fermenter directement le saccharose et le maltose, mais ne peut les invertir.

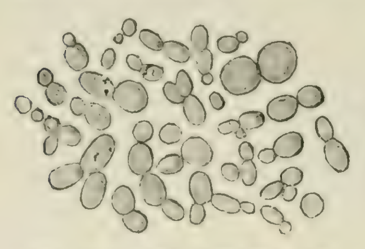


Fig. 14. — *Torula* provenant du sol et cultivé sur le moût de bière.

Des *Torula* (fig. 14), champignons très répandus, forment dans les solutions sucrées des thalles bourgeonnants comme les *Saccharomyces*. Le mycélium typique manque ainsi que la formation de spores endogènes. Ce sont des ferments alcooliques. Quelques formes peuvent donner de l'invertine, mais celles qui ne peuvent pas invertir et faire fermenter le maltose paraissent être, dit Hansen, de beaucoup les plus répandues.

3. — Bactériacées.

Les Bactériacées forment un immense groupe d'organismes très petits, unicellulaires, globuleux ou filiformes, se multipliant surtout par partition, vivant sur les animaux ou végétaux morts ou vivants et amenant dans leur substratum, par leur nutrition et leur extraordinaire pullulation, les modifications chimiques les plus profondes.

D'après leurs formes très différentes, on distingue essentiellement les groupes suivants :

Micrococcus, consistant en cellules sphériques ou ovales qui s'appellent *Streptococcus* quand elles sont disposées en rosette et *Staphylococcus* si elles sont accumulées en masses irrégulières ;

Bacillus, formant des bâtonnets plus ou moins longs qu'on désigne sous le nom spécial de *Clostridium* quand ils sont fusiformes, renflés au milieu. Dernièrement on a proposé d'appeler *Bacterium* les bâtonnets courts et *Bacillus* les plus longs, mais on y a renoncé à cause de l'insuffisance de ce caractère. Par un plus fort allongement les *Bacillus* forment des filaments véritables qui, en se juxtaposant suivant la longueur, donnent des cordons visibles à l'œil nu. Ces formes s'appellent des *Leptothrix*. On n'y a pas observé de rami-

fications semblables à celles des hyphes des moisissures. On désigne sous le nom de *Spirillum* ou de *Spirochæte* les formes enroulées en spirale. Quand les éléments sont simplement courbés, on les appelle *Vibrio*.

Assez souvent les bactéries se présentent sous forme de spores (cellules sphériques ou ovales), qui servent à la reproduction et donnent toujours naissance à l'organisme dont elles proviennent.

Dans les solutions nutritives épuisées et sous l'influence aussi d'autres conditions, les bactéries peuvent, en outre, prendre diverses autres formes anormales provoquées par leur état pathologique (formes d'involution).

Beaucoup de bactéries ont pour caractère de ne posséder qu'une seule forme végétative; chez d'autres, il y en a plusieurs que le même individu parcourt dans son développement suivant un ordre déterminé.

Suivant l'âge et les conditions de nutrition, les diverses espèces subissent des modifications, mais qui ne vont pas jusqu'à altérer les caractères essentiels.

Les cellules des bactériacées sont formées d'une membrane qui, chez quelques espèces, est imprégnée de substances colorantes et parfois entourée d'une enveloppe gélatineuse moulée sur la membrane et d'un contenu protoplasmique où l'on observe souvent de petites gouttelettes d'huile.

Quelques espèces et formes végétatives sont toujours immobiles, ne montrant de mouvement vibratoire que par suite de courants dans la liqueur où elles se trouvent; d'autres sont tantôt immobiles, tantôt vivement agitées, offrant une rotation autour de l'axe longitudinal ou des courbures ou des étirements, ou bien elles se meuvent à l'aide d'un ou plusieurs flagellums.

A l'état de repos, les bactéries se présentent soit isolées, soit en filaments, soit en masses dont les cellules sont reliées par leur enveloppe gélatineuse confluente et qu'on appelle des *Zooglées*.

Lors de la multiplication par division, la cellule croît en longueur, puis montre un étranglement dans son milieu et finalement les deux moitiés se séparent.

Chacune peut subir à son tour de nouvelles partitions ou bien elles

forment des chapelets, des filaments apparents. C'est seulement chez quelques *Micrococcus* (*Sarcina*) qu'on a observé une partition simultanée ou successive dans deux ou trois directions différentes, donnant naissance à des paquets de 4 à 8 cellules.

A côté de la multiplication par division il y a chez beaucoup de bactéries (bacilles et spirilles) une reproduction par spores. Leur mode de formation est très variable. Il peut se faire que les bacilles s'accroissent beaucoup en longueur et qu'après division du contenu en cellules dans l'ordre linéaire habituel, il se forme dans chacune une spore ronde qui devient libre par dissolution des filaments. Dans d'autres cas, les bacilles s'épaississent, prennent une forme en fuseau ou en ellipse ou en têtard ; leur contenu se trouble, une grosse goutte réfringente se sépare pour devenir bientôt une spore. En outre, sans qu'il y ait de modification appréciable dans la cellule, il peut y naître deux, trois ou plusieurs petits points ronds et brillants qui représentent les spores. Enfin, il y a aussi des cas où les spores se forment sur un des pôles de la cellule ou sur les deux.

On distingue, outre cette multiplication par endospores, une reproduction qu'on peut appeler par arthrospores et qui est moins fréquente. Certains éléments d'un chapelet ou d'un amas de cellules bactériennes ont plus de vitalité que les autres ; ceux-ci périssent, tandis que les premiers servent à la multiplication.

La plupart des spores formées par mode endogène ont le caractère de spores durables (*Dauersporen*) plus résistantes que les cellules végétatives de la même espèce. En thèse générale, leur capacité de résistance est grande lorsqu'elles sont desséchées à l'air ; à cet état, elles conservent assez longtemps leur faculté germinative ; mais vis-à-vis des températures élevées leur résistance est très variable. Les spores durables des bacilles supportent généralement sans périr une température de 80°-100°, qui suffit à tuer les spores des *Micrococcus* et des *Spirilles*. La résistance des spores aux agents chimiques est aussi très variable.

Les spores ne germent qu'après un assez long repos. Ordinairement une papille se forme en donnant ensuite un petit bâtonnet ou bien le tube germinatif proémine dans le sens de l'axe longitudinal

de la spore, l'endospore devenant la membrane du tube germinatif, tandis que l'exospore fracturée gît quelque temps encore à côté des bâtonnets de nouvelle création.

On emploie pour la classification des bactéries surtout leurs caractères morphologiques et biologiques. Quatre grandes divisions ont été d'abord établies d'après la forme et suivant qu'il n'y a qu'une seule forme végétative ou un cycle déterminé de ces formes, fait caractéristique d'un assez grand nombre de bactéries.

A la première appartiennent toutes les espèces qui ne se présentent que sous la forme de *Micrococcus ;* la seconde division comprend les bactéries en bâtonnets ou *Bacilles*, la troisième les formes en spirale ou *Spirilles ;* dans la quatrième on range toutes les bactéries dont le cycle de développement offre les formes végétatives les plus diverses.

Les espèces décrites ci-après sont celles qui, d'après les recherches de L. ADAMETZ, C. FLÜGGE, E. KRAMER, P. FÜLLES et autres, ont été trouvées principalement dans le sol, dans les excréments de l'homme et des animaux et dans les matières animales et végétales en décomposition. Ce résumé n'a pas la prétention d'être complet ; il a essentiellement pour objet de donner des indications générales et de pousser à une étude plus approfondie de la bactériologie. Dans ce but et pour ne pas étendre cette exposition plus qu'il ne convient, on ne signalera pas les faits de végétation sur les divers substratums, faits caractéristiques pour nombre d'espèces ; on se bornera à indiquer l'action de chaque espèce sur la gélatine ainsi que la production des matières colorantes et l'on se servira des abréviations suivantes :

L. g. = liquéfie la gélatine.
N. l. g. = ne liquéfie pas la gélatine.
P. c. = produit une matière colorante.
N. p. c. = ne produit pas de matière colorante.

a) *Micrococcées* (*coccacées*).

Ces organismes sont formés de cellules sphériques ou ovoïdes qui ne se multiplient que par division et n'ont aucun mouvement spon-

tané. Quand les cellules nées d'une partition restent accolées, on a un *Diplococcus*. Elles peuvent se séparer ou rester unies en constituant ce qui a été désigné plus haut sous les noms de *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Zooglée* et *Sarcine*.

La zooglée s'appelle *Ascococcus* quand la gelée intercellulaire est très ferme et que la masse apparaît cartilagineuse et comme condensée. On la nomme *Clathrocystis* dans le cas où le mucilage se dissout dans la masse et où il ne reste plus qu'une couche extérieure entourant un espace rempli par la solution.

Micrococcus aurantiacus, COHN (*Bacteridium aurantiacum*, SCHRÖTER). Cellules rondes, incolores, fortement réfringentes, de 1,2-1,4 μ. Dans la solution nutritive de COHN forme à la surface un voile jaune d'or épais de 2-3 millimètres. Pigment soluble dans l'eau. Par modification des couches externes de la membrane, il se produit une matière intercellulaire mucilagineuse englobant les cellules (zooglée). Immobile. — N. l. g. — P. c.

Micrococcus candicans, FLÜGGE. Cellules rondes, assez grosses, associées en masses irrégulières de $0^{mm},4$-$0^{mm},5$. Immobile. — N. l. g. — N. p. c.

Micrococcus candidus, COHN. Cellules globuleuses, fortement réfringentes, de 0,5-0,6 μ. Forme des diplococcus, des tétrades et des zooglées. Immobile. — N. l. g.

Micrococcus cereus albus, PASSET. Coccus de 1,2 μ isolés ou en amas, parfois rangés aussi en chaînes courtes. Immobile. — N. l. g. — N. p. c.

Micrococcus cinnabareus, FLÜGGE. Grands coccus sphériques, souvent en forme de diplococcus et de tétrades. — N. l. g. — P. c.

Micrococcus fervidosus, ADAMETZ-WICHMANN. Coccus petits, ronds, de 0,6 μ, rangés en partie en diplococcus, en partie en petits amas. Immobile. — N. l. g. — N. p. c.

Micrococcus flavus desidens, FLÜGGE. Petits coccus, le plus souvent en diplococcus, mais aussi en amas triangulaire ou en courts chapelets. Immobile. — L. g. — P. c.

Micrococcus flavus liquefaciens, FLÜGGE. Coccus assez gros, associés le plus souvent par deux ou trois, ou en amas. Sans mouvement. — L. g. — P. c.

Micrococcus luteus, COHN (*Bacteridium luteum*, SCHRÖTER). Coccus elliptiques, fortement réfringents, tantôt isolés, tantôt en diplococcus. Longueur : 1,0-1,2 μ. Largeur : 0,8-0,9 μ. Le pigment jaune sécrété est insoluble dans l'eau. Forme des zooglées. Immobile. — N. l. g. — P. c.

Micrococcus, rouge, MASCHEK. — N. l. g. — P. c.

Micrococcus ureæ, PASTEUR, VAN TIEGHEM (fig. 15). Cellules rondes de 0,8-1,0 μ, souvent en diplococcus, tétrades et en chapelets assez longs, ne liquéfiant pas la gélatine et se distinguant surtout par là du *Micrococcus ureæ liquefaciens*, FLÜGGE. Coccus globuleux de 1,25-2 μ, isolés ou en chaînes de 3-10 éléments et aussi en groupes irréguliers.

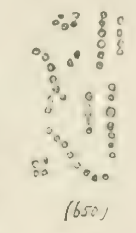


FIG. 15. *Micrococcus ureæ* (d'après COHN).

Micrococcus versicolor, FLÜGGE. Coccus petits, réunis par deux ou en petits amas. — N. l. g. — P. c.

Diplococcus luteus, ADAMETZ. Outre les diplococcus, on trouve des cellules isolées ovales de 1,2-1,3 μ ; cette espèce ne forme pas de tétrades, mais des chapelets de 6-8 cellules et produit une couleur jaune et rouge-brun. Très mobile. — L. g. — P. c.

Sarcina lutea, SCHRÖTER (fig. 16). Cellules rondes de plus d'un μ, se divisant dans trois plans perpendiculaires. Les cellules-filles restent accolées et forment des colonies semblables à des paquets portant les empreintes des liens ayant servi à les ficeler. Sécrète un pigment jaune. — L. g.



FIG. 16. *Sarcina* (d'après FLÜGGE).

b) *Bacilles.*

Les bacilles ont la forme de bâtonnets au moins deux fois plus longs que larges. Ils passent en général par plusieurs des phases précédemment décrites et ne se présentent donc pas exclusivement sous la forme bacille, qui est cependant caractéristique pour eux en ce sens qu'ils proviennent originairement de cette forme et qu'ils y retournent. On observe chez les bacilles une phase de repos, dans

laquelle ils se réunissent souvent en filaments, amas ou zooglées, ou bien une phase de tourbillonnement qui n'a pas encore été constatée dans beaucoup d'espèces.

Bacillus aceticus (fig. 17) [*Bacterium aceti*, KÜTZ]. Ferment acétique. Dans le cours de son développement, il présente des formes très différentes : 1° la forme micrococcus ; 2° la forme en bâtonnet court ; 3° la forme en bâtonnet long ; 4° la forme en leptothrix, qui peuvent se trouver ensemble en zooglées sous forme de voile (mère de vinaigre). Le diamètre transversal des coccus et des bâtonnets est d'environ 1,5 μ. Ils ont une phase de tourbillonnement. Il est remarquable et presque caractéristique pour cette espèce que les bâtonnets longs et les filaments prennent souvent une forme irrégulière, cylindrique avec un gonflement plus ou moins accentué. En même temps, généralement, la membrane s'épaissit un peu. Ce sont là, probablement, des *formes d'involution*, mais il peut se faire qu'elles représentent des arthrospores.



FIG. 17. — *Bacillus aceticus* (d'après ZOPF).

1. État normal : *a*, en bâtonnets longs, courts et en coccus ; *b*, en bâtonnets courts en train de se diviser ; *c*, en chaînes de coccus. — 2. Filaments avec éléments anormaux fortement renflés (formes d'involution). — 3. Amas de coccus. — 4. Amas de bâtonnets.

(700)

FIG. 18. *Bacillus acidi lactici* (d'après FLÜGGE).

Bacillus acidi lactici, HUEPPE (fig. 18). Ferment lactique. Cellules courtes, épaisses, au moins de moitié plus longues que larges et généralement associées par deux, rarement par quatre.

Longueur moyenne des bâtonnets, d'après HUEPPE, 1-1,7 μ ; diamètre transversal, 0,3-0,4 μ ; mais il y a des bâtonnets de 2,8 μ. Les bacilles n'ont pas de mouvement propre. La formation des spores se constate facilement dans les solutions sucrées,

plus difficilement dans le lait. Elle se fait aux extrémités des cellules.

Bacillus albus, EISENBERG. Courts bâtonnets avec les extrémités tronquées. Mobile. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus amylobacter, VAN TIEGHEM. — V. *B. butyricus*.

Bacilles de Bienstock sur les fèces. Trouvés régulièrement par Bienstock dans les fèces de l'homme, semblables au *B. subtilis* par la grandeur et l'aspect, mais sans mouvement propre; il y a deux espèces qui diffèrent par le développement et la forme des colonies. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus butyricus, COHN (*Bacillus amylobacter*, VAN TIEGHEM; *Clostridium butyricum*, PRAZMOWSKY). Ferment butyrique (fig. 19). Bâtonnets de 3-10 μ de long et de 1 μ ou un peu moins de large, formant souvent des chapelets ou des filaments non articulés en apparence. Le plus souvent très mobile, mais immobile aussi et formant des zooglées. Au bout de quelque temps, les bâtonnets deviennent fusiformes ou s'élargissent en têtard à une extrémité. Le diamètre transversal atteint 1,8-2,6 μ pour les cellules épaissies. Alors les spores commencent à se former. Spores ovoïdes de 2,0-2,5 μ de long et 1 μ de large, devenant libres après dissolution de la cellule-mère. Lors de la germi-

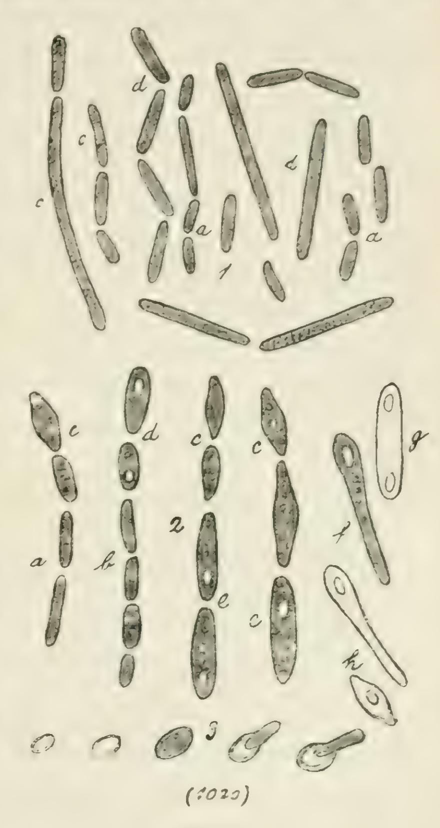


FIG. 19.
Bacillus butyricus (d'après PRAZMOWSKY).

1. Formes végétatives : *a*, bâtonnets courts ; *b*, bâtonnets longs ; *c*, bâtonnets courbés en vibrions. — 2. Formation des spores durables : bâtonnets : *b c*, avant ; *d e*, pendant ; *f g h*, après la formation des spores. — 3. Divers stades de la germination des spores.

nation, le double contour de la membrane disparaît à une extrémité de la spore allongée et en ce point proémine le tube germinatif dans la direction de l'axe longitudinal de la spore. La membrane résistante de la spore ne se vide pas; elle est souvent traînée encore longtemps par le jeune bâtonnet. — L. g. — N. p. c.

Le bacille producteur d'acide butyrique cité par LIBORIUS n'offre morphologiquement aucune différence importante avec le précédent.

Bacillus butyricus, HUEPPE. Isolé par HUEPPE du lait dans certaines conditions sous forme de grands bacilles, ne diffère pas morphologiquement de celui décrit par PRAZMOWSKY.

Bacillus du sol, ADAMETZ. Bâtonnets de 2,5-3 μ de long et 0,6-0,7 μ de large. Souvent en filaments de 15-20 μ de long, ayant un mouvement oscillatoire à une extrémité. Les filaments âgés sont légèrement épaissis à un bout (forme d'involution). — L. g. — N. p. c.



Fig. 20. *Bacillus coprogenes fœtidus* (d'après FLÜGGE).

Bacillus candicans, FRANKLAND. Bâtonnets courts, épais, formant souvent de courts filaments. Immobile. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus jaune-citron, FRANKLAND.

Bacillus coprogenes fœtidus, SCHOTTELIUS (fig. 20). Bâtonnets immobiles à bouts arrondis, presque aussi gros que ceux du *B. subtilis,* seulement plus petits. Formation de spores. Les spores s'accolent en ligne. A la germination, l'axe du nouveau bâtonnet est perpendiculaire sur celui de la spore. Immobile. — N. l. g.

Bacillus cuticularis, TILS.



Fig. 21. *Bacillus denitrificans I* (d'après BURRI).

Bacillus denitrificans I, BURRI et STUTZER (fig. 21). Bâtonnets à bouts arrondis ayant 0,75 μ d'épaisseur et 1,5-2,5 μ de longueur, et de 2-3 μ quand ils sont cultivés dans du bouillon. Sur les jeunes cultures sur plaque, le plus grand nombre des bâtonnets isolés et jumellés est immobile. Quand il y a mouvement, il est très vif. Dans des cultures en bouillon vieilles de deux jours, une grande partie des bâtonnets est immobile. Le bacille est caractérisé physiologique-

ment par ce fait qu'avec le *Bacterium coli commune* ou le *B. typhi abdominalis* et peut-être d'autres espèces encore vivant en symbiose avec lui, il peut détruire d'importantes quantités de nitrate ou de nitrite avec dégagement d'azote élémentaire. — N. l. g. — P. c.



Fig. 22.
Bacillus denitrificans II (d'après Burri).

Bacillus denitrificans II, Burri et Stutzer (fig. 22). Bâtonnets de 0,75 μ d'épaisseur et de 2-4 μ de long. Le mouvement est serpentiforme avec tremblement de tout le bâtonnet. Le bacille a la propriété de faire fermenter d'assez fortes quantités de nitrates et de nitrites avec dégagement d'azote. — N. l. g. — P. c.

Bacillus diffusus, Frankland. Bâtonnets minces et souples, très actifs, d'environ 1,7 μ de long et 0,5 μ de large, isolés ou par deux, formant aussi à l'occasion de longs filaments onduleux. — L. g. — N. p. c.

Bacille du sol (*Erdebacillus*). — V. *B. mycoides.*

Bacillus erythrosporus, Eidam. Bacilles grêles, mobiles, à extrémité arrondie, formant souvent de courts filaments. A la température de la chambre naissent, dans chaque bâtonnet, 2-8 spores ovales accolées en forme de collier de perles et d'une teinte rouge sale. — N. l. g. — P. c.

Bacillus filiformis, Tils.

Bacillus fluorescens liquefaciens, Flügge. Bacilles courts, mobiles, réunis par deux avec étranglement au milieu. On n'a pas observé de formation de spores. — L. g. — P. c.

Bacillus fluorescens putidus, Flügge. Bacilles petits, courts, très mobiles, à bouts arrondis. — N. l. g.

Bacille de l'eau fluorescent, Ehrenberg.

Bacillus gasoformans, Eisenberg. Petits bâtonnets, très mobiles. — L. g. — N. p. c.

Bacille gris, Maschek.

Bacille vert-jaune, Eisenberg.

Bacillus janthinus, Zopf. Bâtonnets plus ou moins longs pouvant tourbillonner et se séparant en éléments plus courts. Donne un pigment violet. Mouvement de rotation et de vibration. — L. g. — P. c.

Bacillus liquidus, Frankland.

Bacillus luteus, Flügge. Bacille court, de grosseur moyenne, paraissant immobile, formant des colonies colorées en jaune. — N. l. g.

Bacillus mesentericus fuscus, Flügge. Bacilles petits, courts, très mobiles, souvent accolés par 2 ou 4 ; formant de petites spores brillantes, irrégulièrement divisées. — L. g.

Bacillus mesentericus vulgatus, Flügge (*Bacille de la pomme de terre*). Bacilles assez gros, à mouvement vacillant, souvent rangés en filaments. Forme des spores rondes. — L. g. — N. p. c.

Bacillus muscoides, Liborius. Bacilles d'environ 1 μ, doués d'un mouvement lent, avec moindre aptitude à former des filaments. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus mycoides, Flügge (*Bacille du sol* ou *B. radiciforme*). Bâtonnets grands et épais, formant sur plaques de gélatine des ramifications profondes, enchevêtrées, simulant une radicelle. Ce bacille a un mouvement propre et forme des spores endogènes ovales et très brillantes. — L. g. — N. p. c.

Bacillus prodigiosus (*Micrococcus prodigiosus*, *Monas prodigiosa*, Ehrenberg). Très petits bâtonnets courts, généralement immobiles, en assez grands amas de 10 éléments et plus. La formation de spores n'y a pas encore été observée. En présence de l'air, ce bacille produit une belle couleur rouge. — L. g.

(1000)

Fig. 23.
Bacillus putrificus coli (d'après Flügge).

Bacillus putrificus coli, Bienstock (fig. 23). Bâtonnets vacillants, très mobiles, d'environ 3 μ de long, souvent plus courts, généralement alignés en longs filaments. A la formation des spores, le bâtonnet se renfle en boule à une extrémité, plus rarement aux deux. La spore reste unie quelque temps au bâtonnet qu'elle traîne derrière elle dans tous ses mouvements. Plus tard, la spore, très réfringente, devient libre par dissolution progressive du bâtonnet et, dans des solutions appropriées, s'allonge de nouveau peu à peu en bâtonnet.

De ceux-ci nouvellement formés naissent d'abord des chaînes de très courts bâtonnets qui s'accroissent ensuite en éléments plus longs et en filaments. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus ramosus (*Bacille radiciforme*). Bacilles courts, à bouts arrondis, environ trois fois aussi longs que larges, formant souvent des chaînes et des filaments. Peu mobiles. — L. g. — N. p. c.

Bacillus saprogenes I, ROSENBACH (fig. 24). Assez grands bacilles, formant une grosse spore à une extrémité.


FIG. 24. *Bacillus saprogenes* (d'après FLÜGGE).

Bacillus scissus, FRANKLAND. Gros bâtonnets immobiles, de grandeur variable, semblables au *B. prodigiosus*. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus stolonatus, ADAMETZ-WICHMANN. Bâtonnets deux fois et demie aussi longs que larges, très mobiles. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus subtilis, EHRENBERG (fig. 25 et 26). Bâtonnets cylindriques ayant jusqu'à 6 μ de long, en moyenne trois fois aussi longs que

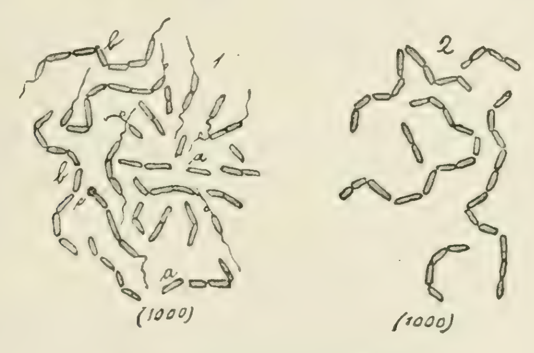


FIG. 25. — *Bacillus subtilis* (d'après BREFELD).

1. Bâtonnets tourbillonnants : *a*, isolés ; *b*, en liaison lâche ; *c*, avec une membrane de spore.
2. Bâtonnets et filaments en végétation non tourbillonnants.

larges. Dans certaines circonstances, les bâtonnets montrent un actif mouvement d'oscillation grâce aux cils qui se trouvent, soit à une, soit aux deux extrémités.

L'accroissement et la division sont rapides ; on a observé un intervalle de 5/4 d'heure entre deux divisions consécutives à la température de 21° et de 20 minutes à 35°. Très souvent il se forme des sortes de filaments qui tantôt laissent reconnaître nettement par leurs brisures en zigzags qu'ils sont formés de bâtonnets, tantôt ne se laissent pas résoudre. Les divers éléments d'un filament sont

généralement à différents stades de croissance et de division et, par suite, de différentes longueurs.

La production des spores est amenée par l'appauvrissement du substratum en matières nutritives. La multiplication et la division des bâtonnets cessent alors peu à peu ; ils deviennent immobiles et,

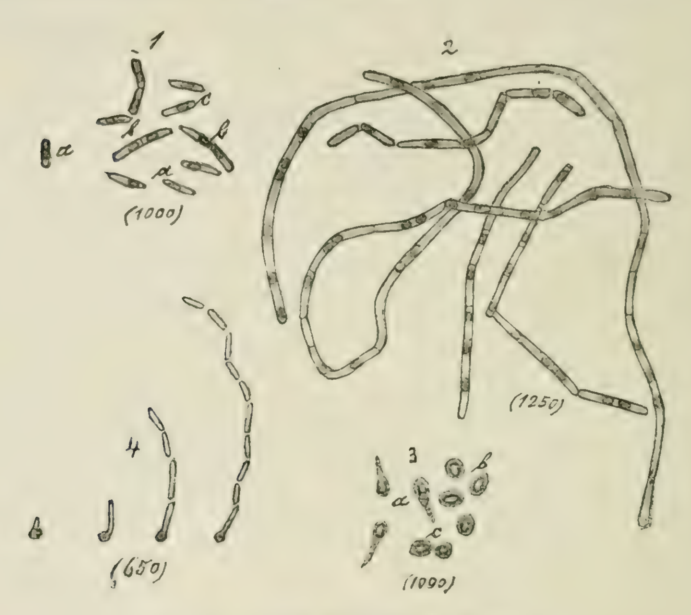


Fig. 26. — *Bacillus subtilis* (d'après Brefeld).

1. Formation des spores : *a* et *c*, dans les bâtonnets ; *b*, dans les filaments. — 2. Filaments en train de former des spores. On ne voit pas nettement les limites des bâtonnets. La formation des spores s'y fait isolément, elle n'est pas du tout simultanée. — 3. Spores mûres, vues : *b*, de côté ; *c*, par le dessus ; *a*, avec des restes de bâtonnets encore adhérents. — 4. Germination d'une spore jusqu'à la formation d'un filament.

au milieu ou à l'extrémité, il se forme une spore endogène, réfringente, à contour sombre, qui s'isole par disparition progressive de la membrane du bâtonnet. Les spores ont 1,2 μ de long et 0,6 μ de large ; vues par le haut, elles paraissent rondes.

A la germination des spores, la membrane se fend transversalement au milieu, mais sans se séparer entièrement ; elle reste adhérente par un point. Le jeune bâtonnet sort verticalement de la fente suivant l'axe longitudinal de la spore. Pendant le développement du bâtonnet, même encore après qu'il a subi de multiples divisions, la

membrane de la spore vide reste adhérente au bâtonnet et l'accompagne dans ses migrations. — L. g. — N. p. c.

Bacillus terrigenus, Frank. Bacille de 0,6-1,8 μ de long, formant des spores, souvent aussi des zooglées. Filaments de longueur variable et d'environ 1 μ d'épaisseur. Immobile. — L. g. — N. p. c.

Bacillus thermophilus (Miquel).

Bacillus ureæ, Leube. Gros bâtonnets à bouts arrondis d'environ 2 μ de long et 1 μ de large. Deux autres bacilles ayant également le pouvoir de transformer l'urée en carbonate d'ammoniaque ont encore été trouvés par Leube. L'un consiste en gros bâtonnets ovales de 1,2-1,5 μ de long et 0,7-0,8 μ de large; l'autre, aux extrémités coupées à angle aigu, avait 1,2-1,4 μ de long et 0,6 μ de large. — N. l. g.

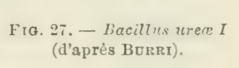


Fig. 27. — *Bacillus ureæ I* (d'après Burri).

Bacillus ureæ I, Burri (fig. 27). Bâtonnets ayant 0,75 μ de large et 10-25 μ de long. Dans les cultures jeunes on constate toujours un mouvement oscillatoire et serpentant. — L. g. — N. p. c.

Bacillus ureæ II, Burri. Bâtonnets de 0,9-1 μ d'épaisseur et 2,5-4 μ de longueur. Sans mouvement. Forme en certaines circonstances des spores. — N. l. g. — N. p. c.

Bacillus ureæ III, Burri. Bâtonnets de 0,9-1 μ d'épaisseur, 2-5 μ de longueur. Forme assez souvent de courts filaments comprenant jusqu'à 5 éléments. On ne peut constater la mobilité toujours et dans toutes les cultures. Elle est très nette pourtant dans les cultures de bouillon et urée. Produit dans certaines conditions des spores variant de la forme globuleuse à la forme ellipsoïdale. — L. g. — N. p. c.

Bacillus viridis pallescens, Frick. Bâtonnets de 2-3 μ de long avec un diamètre 3-4 fois moindre, très mobile. Souvent en filaments. — N. l. g. — P. c.

Bacille blanc, Eisenberg. (Voir *B. albus*.)

Bacterium aerogenes, Miller. Courts bâtonnets mobiles, isolés ou par paires. — N. l. g. — N. p. c.

Bacterium du sol I, Adametz (*Bodenbacterium I*). Bâtonnets de 0,6-0,8 μ de large et de 1,2-1,4 μ de long, généralement accolés

par deux. On n'y a pas observé de filaments. Faible mouvement. Formation de zooglées et d'une coloration bleu-vert fluorescente. — N. l. g. — P. c.

Bacterium du sol II, ADAMETZ (*Bodenbacterium II*). Courts bacilles à bouts tronqués, souvent accolés par 2-8 cellules, sans mouvement propre. Longueur : 1,2 μ ; largeur : 0,8 μ en moyenne. — N. l. g. — N. p. c.

Bacterium coli commune, ESCHERICH. Courts bâtonnets légèrement courbés de 1-5 μ de long et 0,3-0,4 μ de large. En symbiose avec le *Bacillus denitrificans I,* il décompose nitrates et nitrites en dégageant de l'azote. — N. l. g. — P. c.



FIG. 28. *Bacterium Lineola* (d'après COHN). Forme mobile.

Bacterium lindolum, FODOR.

Bacterium Lineola (fig. 28). Cellules cylindriques, très réfringentes, un peu arrondies aux bouts, ayant 3-4 μ de long et 1,2-1,5 μ de large. Outre les bacilles isolés, on trouve souvent des diplobacilles. On n'a pas constaté la forme en filaments. Le contenu des cellules est finement granuleux. D'après COHN, cette granulation est provoquée par le dépôt de substances grasses dans l'intérieur des cellules. Le mouvement des bâtonnets est extrêmement vif.

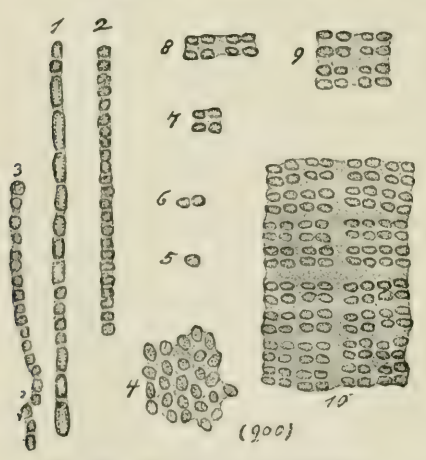


FIG. 29. — *Bacterium merismopedioides* (d'après ZOPF).

1. Filament montrant en même temps des bâtonnets longs, courts et des coccus. — 2. Filament entièrement divisé en coccus. — 3. Filament dont les coccus sont dérangés et isolés. — 4. Ces coccus isolés réunis en une masse irrégulière. — 5-9. Phases successives de la formation des colonies tabulaires. — 10. Colonie de grandeur moyenne comprenant 32 tétrades (groupes de 4 cellules).

Bacterium merismopedioides, ZOPF (fig. 29). Cet organisme forme des filaments d'épaisseur variable (1-1,5 μ) qui se démembrent en bâtonnets longs, puis en courts et enfin en coccus. Ceux-ci deviennent libres par arrondissement réciproque et tourbillonnent vivement. Arrivés à la phase

de repos, ils engendrent à la surface de l'eau, par divisions successives dans un plan, des amas qui forment un voile superficiel et, plus tard, par division dans deux directions, les colonies tabulaires si caractéristiques composées de 64 × 64 cellules. Leur membrane se gélifie avec le temps.

Quand les colonies deviennent plus épaisses, les couches gélatineuses se fusionnent et il naît une zooglée continue tabulaire qui forme un voile mince, se maintenant toujours à la surface de l'eau. Dans des conditions d'alimentation appropriées, les coccus essaiment de ces zooglées tabulaires et se développent de nouveau en bâtonnets et filaments. On n'y connaît pas de spores (ZOPF).

Nitrobactéries de Winogradsky (Bactéries de la nitrification).

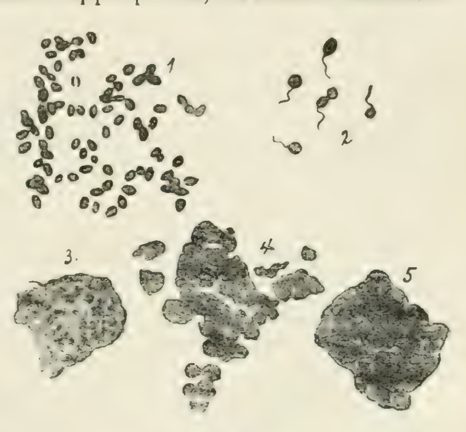


FIG. 30.
Nitrosomonas europæa, de la terre de Zurich (d'après WINOGRADSKY).

1. Microbes cultivés en solution minérale. — 2. Microbes en tourbillonnement. — 3-5. Zooglées. — 1, 2, 3, 5, grossis 1,000 fois; 4, grossi 125 fois.

Nitrosomonas europæa (fig. 30). Dans une terre de Zurich. Cellules ovales ou ellipsoïdes de 1,2-1,8 μ de long et 0,9-1 μ de large. Quand l'accroissement est rapide, les cellules sont plus rondes; elles sont plus allongées quand la croissance est lente. Elles sont isolées ou groupées. Les cellules isolées sont munies d'un petit cil enroulé en spirale sur un tour et demi et se meuvent vivement. Il y a des zooglées. Toute influence défavorable pousse à la formation des zooglées (forme immobile); toute modification utile à l'organisme favorise la production des formes mobiles. On ne connaît pas de spores.

Dans la terre de Gennevilliers, les organismes ne différaient de ceux de Zurich que par l'aspect quelque peu différent des colonies.

Dans la terre de Kasan, ils étaient absolument semblables à ceux de Zurich, mais leur taille réduite de moitié ou des deux tiers, et ils

sont considérés par WINOGRADSKY comme une variété de ceux de Zurich.

Dans la terre de Tokio (Japon), on n'obtint qu'une espèce à peine distincte de celle d'Europe.

Dans la terre d'Afrique (quatre essais), WINOGRADSKY a trouvé un organisme qui ne doit être considéré que comme une variété de celui d'Europe.

Nitrosomonas javanensis (fig. 31) provenant d'un échantillon de sol de Buitenzorg (Java). Cellules de 0,5-0,6 μ seulement de diamètre avec cil ayant jusqu'à 30 μ de long. Malgré la longueur du cil, les cellules ne sont pas très mobiles.

Même dans la phase de tourbillonnement, toutes les cellules ne sont pas isolées, mais groupées. Colonies compactes se désagrégeant tantôt en très petits micrococcus par diffluence, tantôt en colonies plus petites.

FIG. 31.
Nitrosomonas javanensis, de la terre de Java (d'après WINOGRADSKY).

1. Microbes d'une solution nitrifiante. — 2. Microbes en tourbillonnement. — 3. Zooglée en train de se dissocier.

Nitrosococcus. Genre comprenant les organismes du Nouveau-Monde. Semblable aux espèces précédentes. D'une terre de Quito WINOGRADSKY a isolé un très gros coccus de 1,5-1,7 μ de diamètre.

Nitrobactérie (fig. 32). Genre comprenant les organismes qui transforment par oxydation l'acide nitreux en acide nitrique. La figure 32 représente la nitrobactérie, provenant de la terre de Quito, que WINOGRADSKY a élevée en solution nitratée.

FIG. 32.
Nitrobactérie (d'après WINOGRADSKY).

Bacterium termo, EHRENBERG (fig. 33). D'abord considéré comme ferment de la putréfaction et ainsi décrit : Courts bâtonnets arrondis aux bouts, de 1,2-1,5 μ de long et 0,5-0,7 μ de

large, isolés ou par couples, formant des amas irréguliers, ou bien rangés en ligne, ou bien encore en grosses zooglées globuleuses en grappes. Vif mouvement propre chez les individus isolés et jumellés. Aujourd'hui, la désignation de *Bacterium termo* ne doit plus être considérée que comme une appellation générale applicable à un ensemble variable de formes diverses; il faut la laisser de côté, parce que la description s'adapte à une grande quantité de bactéries déjà connues (Flügge).



Fig. 33. *Bacterium termo* (d'après Cohn). Forme mobile.

Bacterium Zopfii, Kurth. Coccus, bâtonnets filaments, ces derniers formant des pelotons spiralés. Les bâtonnets une fois séparés de leur association tourbillonnent. Chaque bâtonnet se partage ensuite en deux coccus qui restent généralement accolés. Zooglées globuleuses, souvent rangées en collier de perles. — N. l. g. — N. p. c.

Bacterium Zürnianum, List. Courts bâtonnets immobiles effilés aux extrémités, larges de ,6-0 ,8 μ et longs de 0,2-1,5. — N. l. g. — N. p. c.

Clostridium butyricum, Prazmowsky. (V. *Bacillus butyricus*.)

Proteus mirabilis, Hauser (fig. 34). Bâtonnets de 0,6 μ de largeur et de longueur très variable, tantôt presque ronds, tantôt ayant 2-3,75 μ de long. Zooglées contournées d'une façon particulière. Souvent il y a des formes d'involution en grands éléments globuleux ou piriformes. — L. g.



Fig. 34. — *Proteus mirabilis* (d'après Hauser). Forme zooglée (95).

Proteus vulgaris, Hauser (fig. 35). Bâtonnets de 0,6 μ de large

avec longueur variable. Suivant les conditions de nutrition, les bâtonnets sont courts et presque sphériques ou ont 1,25 μ et jusqu'à 3,75 μ de long, ou forment des filaments, parfois serpentiformes ou spiralés. Beaucoup de bâtonnets se meuvent activement ; quelques-uns montrent des cils. Il y a des zooglées, souvent aussi des formes d'involution sous l'aspect de grands éléments généralement globuleux. — L. g.

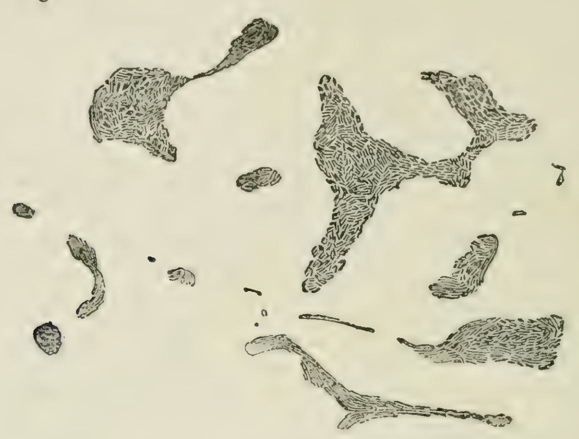


Fig. 35. — *Proteus vulgaris* (d'après Hauser). Ilots tourbillonnants (285).

Proteus Zenkeri, Hauser. Cellules de 0,4 μ de large et 1,65 μ de longueur moyenne, à forme tantôt plus ronde, tantôt plus allongée. Filaments d'où essaiment des bâtonnets. Ilots mobiles formés de bâtonnets et de filaments. Zooglées contournées d'une façon particulière. — N. l. g.

c) *Spirilles.*

On range ici tous les bacilles en forme de filaments courbés et contournés en spirale qui, en se multipliant par division, produisent de nouvelles spirales et qui, généralement mobiles, se réunissent en essaims.

Parmi les espèces qui appartiennent à ce groupe, un petit nombre seulement est intéressant au point de vue agronomique.

Spirillum Rugula (fig. 36) [*Vibrio Rugula*, Müller]. Bâtonnets grêles, faiblement spiralés de 6-8 μ de long et 0,5-2,5 μ de large

qui ont la faculté de se mouvoir et, quand le mouvement a cessé, s'accroissent en bâtonnets courbés en arc. Puis ces bâtonnets se renflent ; leur contenu devient plus dense et à une extrémité on voit un renflement globuleux où, par contraction, se forme une spore sphérique. — L. g.

Spirillum serpens (*Vibrio serpens*) [fig. 37]. Bâtonnets grêles (0,8-1,1 μ de large sur 11-20 μ de long) avec 3-4 spires très mobiles, parfois alignés, mais souvent en gros essaims.

Spirillum Undula (fig. 37). Filaments de 1,1-1,4 μ de large sur 8-12 μ de long, avec 1,5 à 3 spires, ayant un mouvement très vif et pourvus de cils aux deux extrémités.

Fig. 36. — *Spirillum Rugula* (d'après Prazmowsky).

1. Filaments. — 2. Bâtonnets faiblement courbés. — 3. Bâtonnets gonflés se préparant à former des spores. — 4. Bâtonnet élargi en tête à un pôle avant la formation des spores. — 5. Différentes phases de la formation des spores.

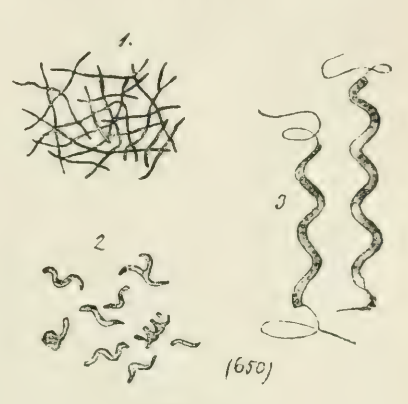


Fig. 37.

1. *Spirillum serpens.*
2. *Spirillum Undula* (d'après Flügge).
3. *Spirillum volutans* (d'après Cohn).

Spirillum volutans (fig. 37). Les filaments ciliés, à 2,5-3,5 spires, ayant 1,5-2 μ d'épaisseur sur 20-30 μ de longueur, sont tantôt mobiles, tantôt immobiles.

Spirochœte plicatilis (fig. 38). Filaments grêles à spires étroites et nombreuses, longs de 110-225 μ, à mouvements très rapides.

(500)

Fig. 38. *Spirochœte plicatilis* (d'après Flügge).

d) *Schizomycètes à formes végétatives variables*[1].

A ce groupe appartiennent quelques espèces aquatiques, étudiées dernièrement par ZOPF, qui montrent un cycle de formes très variées, se présentant sous l'aspect de micrococcus, de bacilles et aussi de spirilles.

Crenothrix Kühniana, RABENHORST (fig. 39). Ses coccus sont des sphères de 1-6 μ de diamètre. Ils se multiplient par bipartitions successives et se réunissent alors en zooglées qui, de microscopiques qu'elles sont d'abord, s'accroissent jusqu'à plus de 1 centimètre et peuvent s'agglomérer dans les eaux en masses gélatineuses à un pied de profondeur. D'abord incolore, le mucilage, par dépôt d'hydroxyde de fer, peut prendre une couleur allant du rouge-brique au brun noir. Cultivés dans l'eau stagnante, les coccus s'accroissent en bâtonnets et en filaments qui ont une épaisseur inégale et présentent une gaine gélatineuse continue et solide, mais mince avec les mêmes dépôts ferrugineux que l'enveloppe gélatineuse des zooglées.

A l'intérieur de la gaine, par divisions transversales successives, les bâtonnets passent à une forme à peu près isodiamétrique et s'arrondissent. Dans les filaments plus larges, les cellules alignées prennent souvent l'aspect de disques plats et se divisent par des parois dirigées suivant l'axe du filament en 2-4 petites cellules qui se dégagent finalement de leur gaine à l'état de coccus, tout comme celles des filaments grêles, en partie par gélification de la membrane sur toute sa longueur, en partie par ouverture de la gaine à son extrémité. Dans ce dernier cas, les coccus glissent d'eux-mêmes par l'ouverture et sont aidés par la poussée qu'ils reçoivent des autres éléments encore engainés et qui s'allongent. Les coccus peuvent, mais c'est assez rare, passer par une phase de mobilité pour revenir à la forme immobile de zooglée. Ce sont ceux qui s'allongent de nouveau en bâtonnets et filaments comme il a été décrit. Les filaments dont il a été question jusqu'ici sont assez droits. Outre ceux-là,

1. Ce sont les bactéries arthrospores de DE BARY.

il y en a d'autres contournés en spirilles qui peuvent aussi se séparer

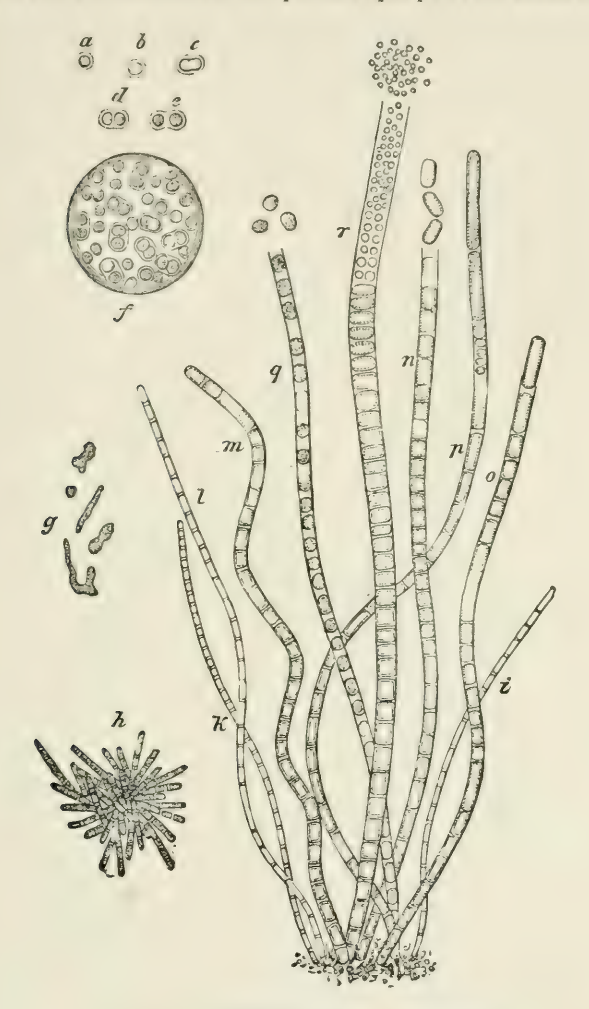


Fig. 39. — *Crenothrix Kühniana* (d'après Zopf).

a-e, coccus ou spores ; *c-e*, en train de se diviser ; *f*, amas de coccus (zooglées) reliés par du mucilage marqué sur la figure par le contour ombré ; *h*, amas de coccus s'allongeant en filaments ; *i-r*, filaments de diverses tailles et formes s'appuyant à la base sur un substratum ; *m-r* montrent la formation de la gaine commune autour de chaque élément ; *q et n* se dissocient à la partie supérieure en leurs éléments ; *r* montre des cellules devenant progressivement vers le haut plus larges et plus courtes et finissant par se diviser par partition longitudinale en spores rondes (coccus) qui se dégagent de la gaine (600) ; *g*, zooglée de coccus. Grandeur naturelle.

en leurs éléments, mais sans passer par une phase mobile, d'après les observations faites jusqu'aujourd'hui (de Bary).

Beggiatoa alba, Vauch. (fig. 40 et 41), forme des filaments qui, s'ils

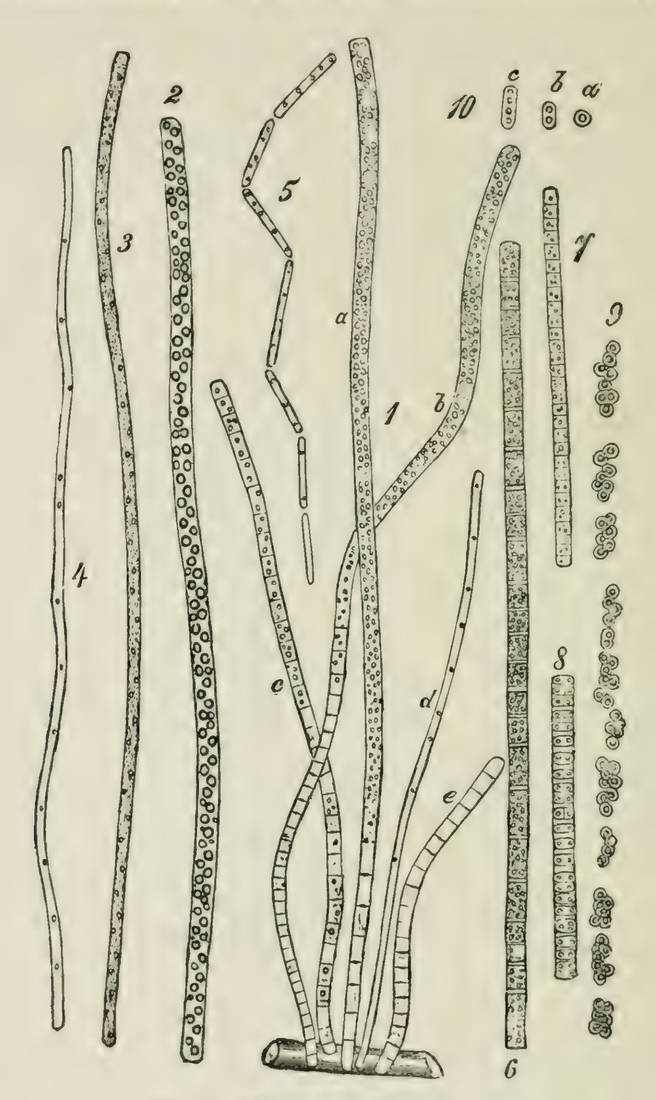


Fig. 40. — *Beggiatoa alba* (d'après Zopf).

1. Groupe de filaments fixés. — 2-5. Filaments de diverses épaisseurs. — 5. En train de se fragmenter. Les petits cercles à l'intérieur des cellules représentent des grains de soufre : là où ils abondent on ne voit pas bien la division transversale, mais ailleurs elle est nette. — 6-8. Fragments de filaments riches en soufre montrant nettement les cloisons transversales après l'action du violet de méthyle. En 8 on voit aussi la division longitudinale de quelques éléments (formation des spores). — 9. Filaments se désagrégeant en spores. — 10. Spores mobiles; les petits cercles qu'elles renferment sont des grains de soufre (1 est grossi 540 fois, 2-10 900 fois).

sont intacts, se dressent verticalement sur des objets solides. Leur largeur est très variable ; elle oscille entre 1 μ et 5 μ. Ils consistent en une seule rangée de cellules dont le protoplasma contient en proportions variables de petits grains de soufre très réfringents dus

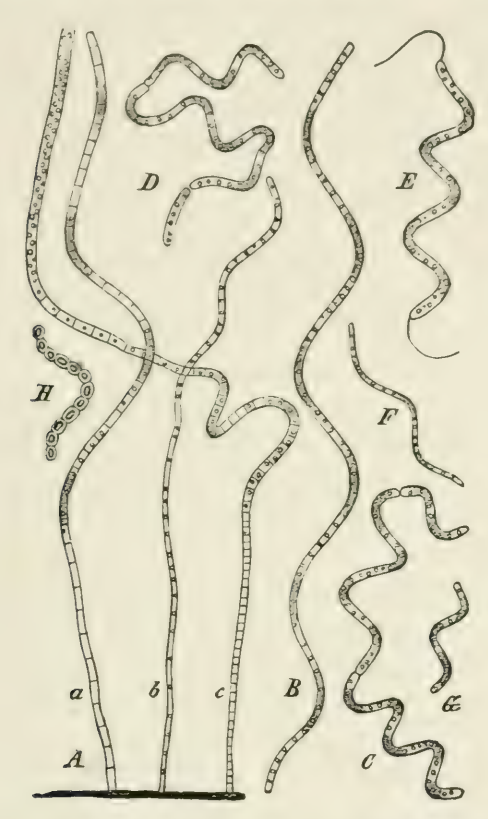


Fig. 41. — *Beggiatoa alba* (d'après Zopf). Formes contournées et spiralées.

A. Groupe de filaments fixés. — B-H. Filaments spiralés. — C, D, F-H. En état plus avancé de fragmentation et immobile. — H. Chaque cellule est nettement distincte. — E. Fragment en mouvement (Spirille) avec un cil à chaque extrémité. Les grains de soufre sont représentés comme dans la figure 40 (540).

à la destruction du sulfate par la plante. Avec un très fort taux de soufre il est difficile de distinguer les cloisons. Les filaments se séparent facilement en fragments par rupture transversale. Leurs éléments passent successivement de la forme étirée en bâtonnet à la forme isodiamétrique et, en outre, dans les filaments plus larges, à

la forme de disques plats qui se partagent finalement par des cloisons longitudinales en 4 quadrants (fig. 40, 6-8). Ceux-ci, de même que les éléments isodiamétriques des filaments minces, s'isolent à la fin (9) en s'arrondissant, entrent en actif mouvement (10), puis passent à l'état de repos en se fixant sur des objets solides. Ils se multiplient rapidement par bipartition et forment des zooglées en masses irrégulières. Ils peuvent plus tard croître en bâtonnets et ceux-ci peuvent donner de nouveau les filaments décrits, après avoir assez souvent passé par une phase de tourbillonnement (DE BARY).

Outre les filaments droits considérés jusqu'ici, ZOPF en a observé d'autres contournés en spirale. Les filaments prennent la forme spiralée, soit au bout, soit en divers points, soit sur tout le parcours (fig. 41, A-G). Les fragments spiralés devenus libres par rupture acquièrent, dans certaines circonstances, la faculté de tourbillonner. Leur mouvement est provoqué par des cils ; ils en ont un à chaque pôle. Les fragments droits ou spiralés qui ne sont pas en train de tourbillonner montrent une grande flexibilité et des mouvements de reptation. Les filaments flexibles ont des courbures très énergiques, souvent entrelacées et ont fréquemment la forme de délicates tresses de cheveux (*Spirulines*) [W. ZOPF].

Beggiatoa roseo-persicina, ZOPF (*Clathrocystis roseo-persicina,* COHN), présente les mêmes formes que *B. alba,* c'est-à-dire des coccus, des bâtonnets, des filaments et des spirilles. Les filaments ne diffèrent de ceux de *B. alba* que par leur couleur rouge (bactério-purpurine). Les coccus sphériques formés dans les filaments se développent par bipartitions successives en zooglées ayant les formes les plus variées. Les colonies semblent tantôt peu, tantôt très mucilagineuses. Dans les eaux ferrugineuses, les gaines de mucilage sont souvent colorées en jaune par l'hydroxyde de fer.

Les coccus s'allongent, dans les colonies, sous certaines conditions, en bâtonnets qui prennent assez souvent la forme de vibrion. Coccus et bâtonnets peuvent entrer en tourbillonnement après la diffluence de la gaine mucilagineuse. Les bâtonnets plus courts s'allongent et forment, en s'alignant les uns près des autres, des filaments qui, comme chez *B. alba,* peuvent montrer une conformation spiralée partielle ou totale.

Cladothrix dichotoma, COHN (fig. 42), forme sur les substances solides des tapis hauts de 1^{mm}-3^{mm}, sinon des amas floconneux nageants. Les filaments, simples d'abord, se ramifient; une cellule du filament produit une petite hernie qui est l'indice du rameau latéral; le bourgeon grandit et donne un court filament cylindrique de même largeur que le filament-mère et qui lui reste d'abord exactement perpendiculaire. En grandissant, ces filaments se cloisonnent transversalement (fig. 42) et se rapprochent presque toujours du filament-mère. Comme ceux du *Crenothrix* ils contiennent des dépôts d'oxyde de fer et ont la couleur qui les caractérise. Les accumulations de vase ocreuse qu'on rencontre souvent dans les sources et les eaux ferrugineuses et dont les éléments filamenteux sont connus sous l'ancien nom de *Leptothrix ochracea,* KÜTZING, sont formées, d'après ZOPF, par le *Cladothrix* ferrugineux.

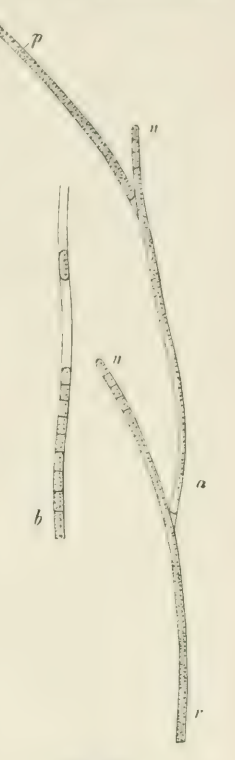


FIG. 42.
Cladothrix dichotoma (d'après DE BARY).

a, extrémité d'un filament vivant. Il a végété d'abord dans la direction *r-p.* Par courbure latérale et croissance ultérieure divergente des éléments sont nées les branches *nn.* A leur sommet la structure en cellules cylindriques ne se reconnaît nettement que sous l'influence des réactifs. — *b,* fragment de filament avec cloisonnement distinct et gaine; celle-ci est vide dans la moitié supérieure, où l'on ne voit qu'une cellule (600).

Les filaments se multiplient tantôt par des fragments qui s'accroissent ensuite et qui présentent des bâtonnets d'autant plus courts qu'il sont eux-mêmes plus petits, tantôt par des spores ou des coccus, c'est-à-dire des cellules courtes et arrondies qui se séparent de la gaine et s'allongent en filaments. Ceux-ci ou leurs rameaux peuvent prendre, au lieu de leur forme habituelle assez droite, une forme spiralée avec spires plus ou moins étroites et ascendantes et celles-ci peuvent, après un cloisonnement transversal, se fragmenter. Tous ces fragments, quelles que soient leur forme et leur longueur, ainsi que les spores rondes et les coccus, jouissent assez souvent d'un mouvement propre, les fragments longs rampant et glissant lentement, les fragments courts tourbillonnant activement.

Filaments, bâtonnets, spirilles et coccus peuvent finalement rester mélangés ou se réunir, par sortes de formes, à l'aide de mucilage, en zooglées qui prennent souvent l'aspect de belles ramifications en buisson. Les formes courtes peuvent à nouveau se dégager de la zooglée à l'état mobile, puis croître en filaments ; pour les spirilles, cette phase ne paraît pas avoir été observée directement (DE BARY).

Outre les espèces décrites, il y a toute une série de bactéries pathogènes qui semblent participer de même, suivant les circonstances, surtout dans le sol, aux processus de décomposition.

CHAPITRE V

RÉPARTITION DES MICROORGANISMES

Ce qui montre l'extraordinaire diffusion à la surface du globe des organismes qui interviennent dans la décomposition des matières organiques, c'est que partout les débris animaux et végétaux sont soumis à la décomposition qui, ainsi qu'on l'a vu, ne peut se produire sans le concours de ces organismes. Leur pullulation dépend essentiellement et des conditions qui leur sont offertes et de leurs exigences biologiques. Il n'est donc pas surprenant que, suivant les localités, non seulement le nombre des organismes soit très différent, mais encore qu'ils soient représentés par des formes tout autres. Car les divers organismes résistent très inégalement aux conditions défavorables de végétation (dessiccation, températures élevées, appauvrissement du substratum) et, d'autre part, dans certaines circonstances, ils peuvent subir un transport plus ou moins lointain comme, par exemple, par les courants aériens ou fluviaux, les animaux, etc. De telles conditions jointes à l'extraordinaire puissance de reproduction des organismes inférieurs expliquent qu'ils se rencontrent tantôt en nombre immense, tantôt réduits à quelques individus, ou même qu'ils manquent totalement.

L'entrée en jeu des phénomènes de décomposition liés à la présence d'espèces déterminées ne dépend pourtant pas du nombre des organismes, parce que, même au cas où il n'y en aurait qu'un seul, sa multiplication rapide peut produire très vite un nombre d'organismes suffisant pour une manifestation intense du processus.

A un point de vue plus spécial, les recherches faites sur la diffusion des organismes non pathogènes, les plus intéressants à considérer ici, ont conduit à des résultats importants pour la solution de différentes questions décisives ; ils vont être brièvement résumés ci-après.

1. — Les microorganismes de l'air.

Parmi les travaux ayant trait à la détermination des germes existant dans l'air, ceux de P. MIQUEL[1] méritent incontestablement la première place à cause de leur étendue et de la méthode rigoureusement scientifique qui y a présidé. Les recherches ont été faites principalement dans le parc de Montsouris, quelques-unes en divers points à l'intérieur de Paris.

Le nombre des bactéries dans un centimètre cube d'air a été, pour une moyenne de 10 années :

Parc de Montsouris (hors de la ville)	300
Place Saint-Gervais (intérieur de la ville).	5,445

Les écarts des moyennes pour chaque mois présentent une certaine régularité comme on le voit par le tableau ci-dessous :

	NOMBRE DE BACTÉRIES par centimètre cube d'air (moyenne de 10 ans).	
	Parc de Montsouris.	Place Saint-Gervais.
Janvier	185	3 074
Février	160	3 648
Mars	195	4 116
Avril	305	4 456
Mai	310	5 874
Juin	335	6 741
Juillet	535	8 006
Août	555	8 256
Septembre	409	7 475
Octobre	240	5 245
Novembre	190	4 639
Décembre	155	3 816
Moyenne de l'année .	300	5 445

C'est donc en août que l'air serait le plus riche en bactéries; le minimum tomberait en décembre et janvier. En comparant les diverses saisons, on voit que l'atmosphère renferme une bien plus

1. P. MIQUEL, *Les Organismes vivants de l'atmosphère*. Paris, 1883, Gauthier-Villars. — En outre : *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris. Les Microorganismes de l'air*, par P. MIQUEL. Traduit par E. EMMERICH. Munich, 1889, M. RIEGER.

grande quantité de bactéries dans les saisons chaudes que dans les saisons froides. Les taux de mucorinées[1] bien plus rares dans l'air que les bactéries sont soumis à des variations incomparablement plus faibles, comme le montrent les chiffres suivants :

TAUX MOYEN DE L'AIR EN ORGANISMES INFÉRIEURS par centimètre cube.

	Parc de Montsouris.		Place Saint-Gervais.	
	Bactéries.	Mucorinées.	Bactéries.	Mucorinées.
Hiver	180	190	3 613	1 420
Printemps	315	145	5 691	1 515
Été	500	225	7 912	2 090
Automne	195	255	4 566	1 690
Pour l'année	300	205	5 445	1 680

De ces chiffres on peut conclure que :

1° Les organismes existant dans l'air, en dehors des circonstances accidentelles, consistent principalement en bactériacées et mucorinées, les premières beaucoup plus nombreuses ;

2° L'air de la campagne (Montsouris) est sensiblement plus pauvre en microorganismes que l'air des villes (Paris) ;

3° La richesse de l'air en microorganismes est soumise (en prenant les moyennes) à des variations régulières ; elle est beaucoup plus grande dans les saisons chaudes que dans les saisons froides.

Ces variations s'expliquent par ce fait que, toutes conditions égales, la multiplication des organismes est réglée par la température ; elle progresse dans une proportion incomparablement plus forte aux températures élevées qu'aux températures basses et, dans le premier cas, il doit y avoir un bien plus grand nombre de germes dans l'atmosphère que dans le second. Ajoutons que pendant l'hiver le sol est généralement humide ou recouvert d'une couche de neige, ce qui rend plus difficile le passage des microorganismes dans l'air, tandis que pendant l'été le sol et les matières organiques en décomposition qui se trouvent à sa surface sont fréquemment desséchés et à cet état n'opposent qu'une faible résistance au transport des organismes dans l'air.

Les variations régulières ci-dessus indiquées ne se présentent que

1. Dans les mucorinées nous comprenons tous les autres hyphomycètes (*Penicillium, Aspergillus, Oidium, etc.*). [Trad.]

pour les moyennes déduites de périodes d'observation assez longues ; elles s'effacent plus ou moins, si l'on n'examine que de temps en temps, par suite de la prépondérance que prennent certaines influences extérieures et locales.

Les alternatives de sécheresse et d'humidité sont tout d'abord de grande importance au point de vue de la quantité des organismes existant dans l'air et, d'une manière très générale, cette influence se précise, d'après les observations de Miquel, par ce fait[1] que : 1° le nombre des bactéries aériennes, faible dans les périodes de pluie, s'élève considérablement quand, à la suite d'une période de sécheresse, toute l'humidité de la surface du sol a disparu ; 2° que les mucorinées présentent le phénomène contraire. Pour expliquer ces faits, Miquel montre que les bactéries adhèrent solidement aux milieux humides où elles se développent ; elles y adhèrent soit en vertu de la capillarité, soit par la formation de mucilage, si bien qu'elles ne peuvent plus être emportées par le vent, ce qui est possible si le substratum se dessèche superficiellement. Si les mucorinées se comportent tout différemment, c'est, pense Miquel, parce qu'elles ne fructifient activement à la surface des organismes qu'à la faveur de l'humidité ; les spores peuvent se répandre d'autant plus abondamment et facilement dans l'air par les temps humides que les fructifications se développent à la surface, tandis que ces mucorinées meurent par la sécheresse ou ne s'accroissent que lentement.

Quant à cette influence de la température et de l'humidité sur le nombre des organismes aériens, il est clair que ces deux facteurs exerceront des actions très différentes suivant leurs variations mutuelles. Voici, d'après Miquel, comment elles se caractérisent :

		Bactéries.	Spores de mucorinées.	
			Jeunes.	Vieilles.
		—	—	—
Saison chaude.	Temps humide .	Rares.	Nombreuses.	Rares.
	Temps sec . . .	Nombreuses.	Rares.	Très abondantes.
Saison froide .	Temps humide .	Rares.	Rares.	Rares.
	Temps sec . . .	Très abondantes.	Nulles.	Très abondantes.

Le vent possède aussi une influence dominante sur le taux de l'air

1. *Les Organismes vivants, etc.*, p. 216 et p. 60.

en microorganismes; sa violence est à considérer et aussi sa direction. Son action sur la quantité des bactéries est faible dans le cas où le sol et les matières organiques gisant à la surface sont humides; mais elle grandit dans la mesure où s'opère le dessèchement superficiel et, toutes circonstances égales, croît avec la force du vent.

La direction du vent a de l'importance dans le cas où des localités voisines ont des taux différents de bactéries. Ainsi, les recherches faites à l'observatoire de Montsouris, situé en dehors et au sud de Paris, ont montré[1] que les vents soufflant de la campagne, donc ceux du sud, du sud-est et du sud-ouest, abaissaient sensiblement le taux des microbes, tandis que ceux du nord qui avaient passé sur Paris augmentaient ce taux, comme le montrent suffisamment les chiffres suivants:

	DIRECTION DES VENTS.							
	N.	N.-O.	O.	S.-O.	S.	S.-E.	E.	N.-E.
	—	—	—	—	—	—	—	—
Nombre de microbes par centimètre cube	124	108	77	58	42	74	134	152

Cette influence de la direction des vents diffère évidemment suivant la situation réciproque des points que l'on étudie.

Les microorganismes transportés par le vent se déposent en partie quand le vent tombe; c'est un fait qui diminue dans une large mesure la teneur de l'air en organismes et qui se présente partout où des obstacles quelconques brisent la violence du vent. C'est, entre autres, le cas pour les forêts, qui diminuent cette violence à un très haut degré. Pour déterminer l'influence de la forêt sur la quantité de germes existant dans l'air, A. Serafini et J. Arata[2] ont fait, dans un petit bois de la Villa Médicis, à Rome, des essais d'après la méthode de Strauss, en analysant tous les jours, du 6 mai au 8 juillet, l'air pris dans le massif à 30-40 mètres du bord et l'air pris au bord du bois.

	NOMBRE de microorganismes par centimètre cube.	
	Hors bois.	Sous bois.
	—	—
Mucorinées.	2 670	1 726
Bactéries liquéfiant la gélatine	4 914	4 786
Bactéries ne liquéfiant pas la gélatine . . .	2 327	1 198

1. *Les Organismes vivants, etc.*, p. 218.

2. *Bolletino della R. Accademia medica di Roma.* Anno XVI, 1889-1890. Fasc. VIII. Roma, 1890.

En moyenne, l'air de la forêt était plus pauvre en microorganismes que l'air extérieur. Parfois, il est vrai, le nombre des bactéries et des mucorinées était plus grand sous bois, car il peut s'en former là ; mais, en général, c'était le contraire. Une seule fois, les trois catégories furent plus nombreuses en forêt ; dans les 39 autres cas, toujours une ou deux catégories étaient plus nombreuses hors forêt ; les bactéries non liquéfiantes le furent 28 fois, les bactéries liquéfiantes 23 fois et les mucorinées 25 fois. Dans 8 prises d'essai, les trois groupes furent plus abondants hors forêt. Dans 3 dosages seulement on obtint le même nombre de germes pour les deux milieux.

De tels résultats, obtenus dans un milieu producteur lui-même de microorganismes, sont dus évidemment à ce que la forêt agit comme un filtre retenant une partie de ceux qui flottent dans l'air. Les auteurs que nous venons de citer se croient autorisés à conclure que *la forêt exerce une sorte de filtration sur les organismes transportés par le vent.*

Ce résultat n'a rien d'étonnant si l'on réfléchit que les arbres présentent de grands obstacles à la circulation des microbes et qu'ils brisent la violence du vent, si bien que les organismes sont forcés de tomber sur le sol. Ils y restent soit par manque d'une force nouvelle qui les enlève, soit fixés par l'humidité du sol. Il est probable que les différences seront d'autant plus grandes que les vents seront plus forts et les forêts plus épaisses.

Quant à l'influence de la situation sur le nombre des organismes aériens, on a déjà dit qu'en général l'air est d'autant plus riche en germes que la décomposition des matières organiques est plus active, toutes circonstances égales, et l'on vient de montrer que, d'accord avec cette notion, l'air des villes est incomparablement plus riche que l'air des champs. L'air contenu dans des chambres closes et surtout habitées accuse encore des chiffres plus élevés. D'après Miquel[1], tandis que l'air de la rue de Rivoli contenait 3 480 germes (moyenne d'un trimestre), celui des chambres du laboratoire de Montsouris (1884) en renfermait 7 420, celui des vieilles maisons de Paris (1881-1882), 36 000, celui du nouvel Hôtel-Dieu, à Paris (1880), 40 000, et

1. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour l'an 1885, p. 504.

celui de l'hôpital de la Pitié (1882), 79000. Le voisinage des égouts ne semble pas avoir beaucoup d'influence ; on y trouve tantôt plus, tantôt moins de bactéries qu'en plein air. Ainsi, par exemple, MIQUEL a trouvé en 1891[1] :

	TAUX MOYEN PAR CENTIMÈTRE CUBE.			
	Air des égouts.		Air du centre de Paris.	
	Bactéries.	Mucorinées.	Bactéries.	Mucorinées.
Hiver	4 085	1 835	5 730	2 525
Printemps.	2 125	10 615	9 235	3 515
Été	7 555	5 000	15 310	1 835
Automne	5 615	1 360	7 225	1 840
Moyenne	4 845	4 705	9 375	2 430

On voit que l'air des égouts était plus pauvre en bactéries, mais, par contre, au printemps et en été, notablement plus riche en mucorinées que l'air libre. La moyenne annuelle donne presque la même proportion pour ces deux catégories dans l'air des égouts, tandis qu'à l'air libre les moisissures sont bien plus rares que les bactéries.

L'air de la mer et des montagnes est d'une pureté extraordinaire.

Les observations faites, à l'instigation de MIQUEL[2], à bord du *Sénégal,* sur les côtes du Brésil, de l'Afrique, des îles Canaries et dans le golfe de Gascogne ont donné, pour un total de 112855 litres d'air, 102 bactéries, ce qui correspond à un taux moyen d'un germe par centimètre cube. Au delà de 100 kilomètres des côtes, le taux tombe à 0,06 ; à des distances moindres, il est de 1,8.

L'air des montagnes se rapproche de celui de la mer. VON FREUDENREICH[3], qui a examiné l'air des Alpes bernoises et italiennes à des altitudes de 2000-4000 mètres, a trouvé, dans les années 1883-1884, une moyenne d'une bactérie par centimètre cube, tandis qu'à Berne l'air en contenait 3-400. Ce fait semble montrer que le taux des germes diminue avec l'altitude, comme l'ont aussi établi les recherches de MIQUEL ; l'air pris au sommet du Panthéon renfermait beaucoup moins de bactéries que celui du parc de Montsouris.

Citons encore en terminant l'observation de MIQUEL, d'après la-

1. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour les années 1892-1893, p. 471.
2. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour l'an 1886, p. 547.
3. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour l'an 1885, p. 504.

quelle les bactéries aériennes sont soumises à des variations quotidiennes régulières qui passent par deux minima (2-3 heures du matin et 2-3 heures du soir) et deux maxima (7-8 heures du matin et 8 heures du soir) ; on a démontré que ces variations sont soumises à des influences extérieures (météorologiques), à des circonstances locales et aussi à d'autres causes encore inconnues.

Quant à la nature de ces organismes, on a reconnu que les trois groupes principaux distingués plus haut (Mucorinées, Levures, Schizomycètes) y étaient représentés, mais à des degrés divers. Ce sont les Levures ou Saccharomycètes[1] qui s'y trouvent le plus rarement ; les Mucorinées (moisissures) et les Schizomycètes (Bactériacées) forment dans l'air la majeure partie de ces germes qui participent à la décomposition des matières organiques[2] et, d'après les recherches de Miquel, les Schizomycètes sont plus abondants que les Mucorinées.

Parmi les Mucorinées, les espèces ordinaires (*Mucor, Penicillium, Aspergillus, Oidium lactis*[3], etc.) existent en assez grand nombre, représentées par leurs spores largement répandues. Parmi les champignons se multipliant par bourgeonnement, qui existent partout mais en très petite quantité, les Saccharomycètes sont les plus rares, *Monilia* et *Torula* sont un peu plus abondants ; les *Saccharomyces ellipsoideus, S. glutinis, S. Pastorianus, S. mycoderma, S. apiculatus* se voient plus souvent que *S. cerevisiæ*. Les Schizomycètes sont représentés par les quatre groupes définis ci-dessus. D'après Miquel, les Micrococcus tiennent le premier rang, puis viennent les Bacilles, en troisième lieu les Spirilles et les Schizomycètes à formes variables sont extrêmement rares ou manquent. L'ordre de fréquence dans l'air est le suivant : *Micrococcus ureæ, M. ureæ liquefaciens, M. cinnabareus, M. flavus liquefaciens, M. flavus desidens, M. versicolor, M. aurantiacus, Bacillus butyricus, B. subtilis, B.*

---

1. E. C. Hansen, *Mittheilungen aus dem Carlsberger Laboratorium*. Fasc. II, p. 1. Vienne, 1880. — G. Gistel et Cie, *Zeitschrift für das gesammte Brauwesen*. Neue Folge. Ve année, 1882, p. 208, 226 et 247.

2. Il y a aussi dans l'air des spores de beaucoup d'autres champignons, des grains de pollen, etc.

3. Rappelons que, pour plus de simplicité, nous rangeons parmi les mucorinées d'autres hyphomycètes tels que *Penicillium, Aspergillus, Oidium*. (Trad.)

prodigiosus, B. ureæ, B. erythrosporus, B. fluorescens liquefaciens, B. luteus, B. mesentericus fuscus, B. mesentericus vulgatus, etc. Plus rarement, on trouve *Bacillus aceti, B. acidi lactici*.

2. — Les microorganismes des eaux.

a) *Les eaux météoriques.*

Les eaux météoriques sont toujours plus ou moins pourvues de Bactéries et de Mucorinées, comme le montrent clairement les recherches de MIQUEL[1]. L'eau du parc de Montsouris contenait, par litre :

MOIS.	1883.	1884.	1885.	MOYENNE.
Janvier	»	»	8 000	8 000
Février	»	1 850	790	1 320
Mars	»	3 830	2 000	2 920
Avril	»	3 700	4 580	2 140
Mai	»	2 480	2 400	2 440
Juin	»	5 500	5 700	5 600
Juillet	»	»	»	»
Août	»	»	8 300	8 300
Septembre	»	6 980	4 560	5 770
Octobre	3 800	3 560	2 300	3 220
Novembre	1 000	5 500	»	»
Décembre	1 250	7 420	»	»
Moyenne annuelle		4 540	4 200	4 300

On voit qu'en somme les eaux de pluie étaient plus riches en bactéries dans les saisons chaudes que dans les saisons froides. Les taux des microbes peuvent osciller entre 300 et 20 000 par litre, dans le cas où l'eau provient d'une averse abondante ayant purifié l'atmosphère. Dans la première eau recueillie à la suite d'un orage ou après une longue sécheresse, le nombre des bactéries est incomparablement plus grand et peut s'élever à 200 000 et plus par litre.

Sur 100 microbes trouvés dans l'eau météorique, il y a, en moyenne, 60 micrococcus, 25 bacilles et 15 bactéries. Dans certains

1. *Loc. cit.*

cas, les rapports sont très différents, comme le montrent les chiffres suivants :

	MICROCOCCUS.	BACILLES.	BACTÉRIES.	TOTAL
	—	—	—	—
3 avril.	55	35	10	100
4 avril.	15	85	0	100

Les spores des mucorinées vulgaires sont aussi très abondantes dans les eaux de pluie. Le nombre de ces germes est, en moyenne, de 4000 par litre, ce qui fait que la quantité de microorganismes vivants contenus dans un centimètre cube dépasse 8.

D'après les chiffres précédents, les précipitations annuelles à Montsouris, où elles atteignent une hauteur de 600 millimètres, apportent au sol, par mètre carré, plus de 4 500 000 organismes.

Ces observations démontrent que les précipitations atmosphériques font baisser le taux des microbes aériens, exercent à ce point de vue sur l'air une action d'épuration et ramènent en partie au sol les germes que les vents et les courants aériens lui ont enlevés, surtout pendant les sécheresses.

b) *Eaux de sources et de rivières.*

Les eaux de sources, quand elles proviennent directement de nappes souterraines, doivent contenir, si on les compare aux eaux des ruisseaux, rivières, étangs, la plus faible proportion de microorganismes. C'est ce qui arrive en effet ; cela tient à ce que les eaux qui s'enfoncent profondément sont dépouillées par le sol de la plus grande partie de leurs microbes et à ce que les couches profondes du sol sont exemptes de germes. L'extraordinaire pouvoir d'épuration du sol est démontré par ce fait (constaté par MIQUEL) que l'eau de la Marne est privée du plus grand nombre de ses bactéries quand on la recueille après filtration dans un drain (drain de Saint-Maur). Les chiffres suivants le prouvent :

SAISONS.	BACTÉRIES dans un centimètre cube.	
	Marne.	Drain de St-Maur.
—	—	—
Hiver.	94 855	3 815
Printemps	35 605	1 905
Été.	21 615	1 065
Automne	82 130	2 720
Moyenne annuelle.	58 550	2 375

Les eaux provenant de la Vanne et de la Dhuis, désignées par MIQUEL comme eaux de source, emmagasinées dans les bassins de Montrouge et Ménilmontant pour l'approvisionnement de Paris, contiennent un taux très variable de microbes. La moyenne annuelle est de :

	Bactéries dans un centimètre cube.	
	Vanne.	Dhuis.
Réservoir.	1 240	2 900
Canal	2 565	3 615

Ce taux est considérablement plus élevé que celui des eaux météoriques.

Les eaux des fleuves sont cependant encore sensiblement plus riches, comme il résulte des observations suivantes de MIQUEL :

	Bactéries par centimètre cube.				
	Seine.			Marne à Saint-Maur.	Ourcq.
	A Ivry.	Au pont d'Austerlitz.	A Chaillot.		
Janvier.	55 500	63 315	241 510	71 590	142 525
Février.	90 590	111 515	249 075	103 125	113 865
Mars.	78 230	96 870	226 425	109 845	98 310
Avril.	69 260	61 410	110 100	40 835	57 125
Mai.	37 310	60 280	91 020	45 210	79 370
Juin.	46 300	62 985	126 875	20 765	14 135
Juillet.	18 810	34 900	92 750	36 150	19 690
Août.	17 985	31 450	172 500	18 560	11 375
Septembre	23 085	92 405	249 750	10 140	13 290
Octobre	24 450	50 245	258 875	27 440	54 395
Novembre.	45 575	65 440	158 750	126 700	135 025
Décembre.	165 125	150 170	153 875	92 250	179 625
Moyenne annuelle.	56 185	73 500	177 625	58 550	76 545

Ces chiffres montrent que les eaux de fleuve ont une forte teneur en bactéries, qui s'accroît constamment par le passage à travers une grande ville (Seine d'Ivry à Chaillot), et aussi que cette teneur atteint son minimum en été et son maximum en hiver.

c) *Eaux d'égout.*

Dans les eaux d'égout, le taux des bactéries s'élève dans une mesure énorme. Ce taux a été déterminé par MIQUEL dans des échan-

tillons pris à la bouche des collecteurs de Saint-Ouen et de Clichy à Paris. Le tableau suivant indique les résultats :

SAISONS.	BACTÉRIES PAR CENTIMÈTRE CUBE.	
	1891.	Année moyenne.
Hiver	28 170 000	19 870 000
Printemps	17 330 000	19 330 000
Été	25 170 000	16 635 000
Automne.	17 670 000	9 220 000
Moyenne annuelle .	22 585 000	16 270 000

Sur 100 organismes il y a 40 micrococcus et bactéries et 20 bacilles.

Malgré leur extraordinaire impureté, ces eaux sont très vite épurées quand elles traversent le sol ; car les eaux de drainage qui s'écoulent des champs d'épuration ne possèdent plus qu'un taux relativement très faible de bactéries.

A Gennevilliers, Miquel a trouvé, par exemple, les chiffres suivants par centimètre cube d'eau de drainage à

ASNIÈRES.	ARGENTEUIL.	MOULIN DE CAGE.	ÉPINAY.
5 830	38 170	8 170	26 500

L'examen de l'eau sale, noirâtre, nauséabonde qui s'écoulait d'une fosse remplie d'immondices a donné un taux moyen de 29 645 000 microbes par centimètre cube.

Quand cette eau est soumise, à l'usine de Bondy, à une température assez élevée, elle perd une notable partie de ses organismes ; leur nombre tombe, dans certaines circonstances, à 55 020 par centimètre cube.

Les bactéries les plus abondantes dans l'eau sont à peu près les suivantes[1] :

Micrococcus flavus liquefaciens, Micrococcus flavus desidens, M. aurantiacus, M. cinnabareus, M. luteus, M. versicolor, M. candicans, Diplococcus luteus et diverses autres espèces, *Bacillus fluo-*

1. Une liste des bactéries aquatiques se trouve dans J. Eisenberg, *Bacteriologische Diagnostik.* Hamburg et Leipzig, 1891. L. Voss, p. 22.

rescens liquefaciens, B. subtilis, B. erythrosporus, B. janthinus, B. mycoides. Beaucoup d'autres espèces s'y trouvent encore : *Bacterium Zürnianum;* en outre : *Crenothrix, Cladothrix, Beggiatoa.*

d) *Eaux marécageuses et stagnantes.*

Les eaux marécageuses et stagnantes renferment, entre autres, *Bacillus butyricus, Spirillum Rugula, S. serpens, S. Undula, S. volutans, Spirochæte plicatilis.*

3. — Les microorganismes du sol.

Les analyses microscopiques du sol ont montré que les couches supérieures étaient extraordinairement riches en microorganismes, notamment en bactéries. Ainsi dans un gramme d'un sol de pré jusqu'à $0^m,20$ de profondeur, M. MIQUEL[1] a trouvé en moyenne :

		BACTÉRIES.
Montsouris		700 000
Gennevilliers	Terre arrosée d'eau d'égout	870 000
	Terre non arrosée	900 000

Les bactériacées les plus abondantes sont des bacilles. D'après les recherches du même auteur, il y aurait, dans le sol cultivé, sur 100 bactériacées 90 bacilles. A la surface de l'humus, on trouva beaucoup de micrococcus.

Ces résultats sont confirmés par des recherches de R. KOCH[2] qui montra que, même en hiver, il y avait une très grande quantité d'organismes inférieurs dans divers échantillons de sols provenant soit d'endroits très peuplés (Berlin), soit de champs éloignés.

Les bacilles y étaient aussi prédominants. Dans de la terre fraîche, on trouva, en outre, des micrococcus, mais en moindre quantité. Dans quelques cas pourtant, par exemple dans des sols pris sur des places recouvertes de tas de fumiers, les micrococcus étaient plus

1. *Annuaire de l'Observatoire de Montsouris* pour l'an 1882.
2. *Mittheilungen aus dem Kaiserl. Gesundheitsamte.* I. Berlin, 1881, pp. 34-36.

nombreux que les bacilles et il y avait aussi des moisissures ; mais ce n'était qu'un accident. Dans les couches supérieures du sol des contrées habitées et partout où s'exerce la culture des champs et des jardins, les bacilles paraissent exister constamment en plus grande quantité. On les a trouvés aussi abondamment dans le jardin de l'école vétérinaire de Berlin que dans un cimetière abandonné ou dans des sols de jardins et de champs, loin de lieux densément habités.

L. ADAMETZ[1] a examiné, dans deux champs voisins, des échantillons de sols pris à la surface et à 20-25 centimètres de profondeur. Les deux couches présentèrent des levures et des mucorinées en quantité modérée et des bactéries au contraire en nombre immense. En employant l'appareil de THOMAS pour compter les bactéries, on en a trouvé dans un gramme de terre les quantités suivantes :

	SURFACE.	A 20-25 CENTIMÈTRES de profondeur.
Sol siliceux.	380 000	460 000
Sol argileux.	500 000	464 000

Le nombre des mucorinées ne s'élevait qu'à :

	SURFACE.	A 20-25 CENTIMÈTRES de profondeur.
Sol siliceux	50	40
Sol argileux	50	50

Les organismes appartenaient aux espèces suivantes :

1° 6 Mucorinées (*Penicillium glaucum, Mucor mucedo, M. racemosus, M. stolonifer, Aspergillus glaucus, Oidium lactis*) ;

2° 4 Levures (*Saccharomyces ellipsoideus, S. cerevisiæ, S. glutinis, Monilia candida*) et deux espèces nouvelles de cellules semblables aux levures : elles présentent le bourgeonnement et les vacuoles des levures, décomposent le sucre, mais ne donnent pas de mycélium comme les Mucorinées ;

3° Parmi les Bactériacées : 4 Micrococcus (*M. candidus, M. luteus,*

1. *Untersuchungen über die niederen Pilze der Ackerkrume.* (*Inaugural Dissertation.*) Leipzig, 1876.

M. aurantiacus, Diplococcus luteus), 4 Bacterium (*B. n° 1, B. n° 2, B. lineola, B. termo*), 3 Bacillus (*B. subtilis, B. n° 2, B. butyricus*) et, dans le genre *Vibrio* (*Spirillum*), le *V. Rugula*.

En ce qui concerne la répartition des microorganismes dans le sol, R. Koch[1] était déjà arrivé à ce résultat que leur taux décroissait très vite avec la profondeur et qu'à 1 mètre un sol non remué est presque exempt de bactéries. Même au milieu de Berlin, sur des échantillons de sol pris dans une fouille pour fondation fraîchement creusée, Koch n'a trouvé, à 1 mètre de profondeur, aucun bacille et seulement des colonies très rares de très petits micrococcus après ensemencement sur gélatine. Dans un cas, la terre provenait d'une nouvelle construction élevée dans la Philippstrasse, au voisinage immédiat de la Panke, à 2 mètres de profondeur, niveau des eaux de la Panke, dont l'échantillon n'était distant que de 2 mètres à peine ; néanmoins il s'est montré extraordinairement pauvre en microorganismes.

Les résultats des recherches plus approfondies exécutées par C. Frænkel[2] concordent avec l'observation de Koch. Nous mentionnerons ici seulement les chiffres de sa première série d'essais.

Sol des environs de Potsdam (1886-1887).

PROFONDEUR.	NOMBRE DE GERMES DANS UN CENTIMÈTRE CUBE.								
	21 avril.	27 mai.	12 juin.	9 juillet.	14 août.	4 septembre.	2 octobre.	3 novembre.	16 mars.
Surface . .	»	150 000	110 000	»	300 000	95 000	130 000	55 000	80 000
$0^m,50$ . .	70 000	200 000	90 000	»	240 000	65 000	100 000	75 000	85 000
$0^m,75$ . .	25 000	»	»	»	40 200	3 000	»	8 000	»
$1^m,00$ . .	1 000	2 000	2 000	4 300	80 000	600	40 000	7 000	3 000
$1^m,50$ . .	200	15 000	2 000	400	500	700	600	200	300
$2^m,00$ . .	»	2 000	600	300	400	»	700	100	200
$2^m,50$ . .	250	500	700	»	100	»	150	»	150
$3^m,00$ . .	»	3 000	100	»	»	150	»	1 500	100
$3^m,50$ . .	»	»	800	»	»	100	1 400	50	700
$4^m,00$ . .	»	»	150	300	»	»	600	»	»

1. *Loc. cit.*

2. *Zeitschrift für Hygiene*. Vol. II. Fasc. 3, 1887, pp. 521-582.

On voit nettement par ce tableau que les couches supérieures d'un sol vierge, non remué, sont pourvues très différemment de microorganismes jusqu'à une profondeur variant de $0^m,75$ à $1^m,50$, mais qu'à partir de ces limites il y a une diminution subite et générale du taux des bactéries et les couches plus profondes, même celles qui appartiennent à la nappe souterraine, semblent pures de germes soit aérobies, soit anaérobies.

Dans la deuxième série d'essais, Frænkel obtint les chiffres suivants :

Sol de divers points habités de Berlin (1885-1886).

PROFONDEUR.	NOMBRE DE GERMES DANS UN CENTIMÈTRE CUBE.							
	20 juillet.	26 juillet.	7 août.	8 août.	1er novembre.	6 avril.	11 novembre.	(Jardin.)
Surface.	8 000	350 000	160 000	»	300 000	»	»	450 000
$0^m,50$	6 500	50 000	40 000	»	»	»	»	300 000
$1^m,00$	45 000	800	10 000	35 000	1 000	100 000	80 000	150 000
$1^m,50$	3 500	»	»	50 000	2 000	180 000	20 000	80 000
$2^m,00$	»	750	6 000	15 000	3 500	65 000	49 000	200 000
$2^m,50$	»	»	»	20 000	300	470 000	650	700
$3^m,00$	»	»	300	500	1 000	34 000	600	100
$3^m,50$	»	»	»	150	750	»	3 000	»
$4^m,00$	»	»	»	»	»	»	900	»

Ici encore on constate une richesse extraordinaire des couches superficielles en microorganismes et la quantité des bactéries y est sensiblement plus grande que dans le sol vierge. Néanmoins, il y a ici aussi une dépression très nette à mesure qu'on s'enfonce plus profondément, déjà parfois à 1 mètre, mais le plus souvent à $1^m,50$ ou 2 mètres, dépression qui, procédant par larges bonds, conduit finalement à la disparition complète des microorganismes. Parmi les nombreux organismes des couches supérieures, il n'y a presque pas d'anaérobies.

Bien que ces observations, vu leur petit nombre, ne puissent être érigées en loi générale, il faut reconnaître que le sol qui est compris depuis des siècles dans le cercle de l'activité humaine, sur

lequel ont vécu de longues suites de générations, qui, pendant ce temps, a dû recevoir tous les détritus de ses habitants, se comporte absolument comme un sol intact, c'est-à-dire que *ses couches superficielles sont riches en microorganismes variés, les couches profondes (en y comprenant celles qui sont au niveau de la nappe aquifère) étant, par contre, pauvres en germes ou même n'en possédant pas.*

Cette diminution et cette disparition des bactéries, même dans des sols habités, est attribuée par FRÆNKEL en partie à ce que le sol agit comme un filtre de sable qui ne laisse pénétrer les microorganismes qu'à de faibles profondeurs, en partie aussi à ce qu'il règne à ces profondeurs une température à laquelle beaucoup de bactéries ne se développent plus, comme l'ont montré des essais directs.

Parmi les autres recherches bactériologiques, celles de P. FÜLLES [1] sont particulièrement dignes d'intérêt, parce qu'elles s'étendent non seulement au nombre des organismes et à leur nature, mais aussi aux différents états du sol. Il prit : 1° de la terre provenant d'un champ cultivé dont la croûte de 50 centimètres d'épaisseur reposait sur une couche solide de quartz ; 2° un sol pierreux de vignoble ; 3° un sol de forêt dont la couche supérieure, riche en humus, épaisse de 60 centimètres, reposait sur du gneiss ; 4° un sol d'une prairie située le long d'un fleuve.

Tous ces sols provenaient des environs de Fribourg-en-Brisgau. A titre de comparaison, on analysa aussi le sol du Rosskopf (739 mètres) et du Schauinsland (1 286 mètres).

Voici les espèces trouvées :

I. Micrococcus ne liquéfiant pas la gélatine : 1° *Micrococcus aurantiacus* ; 2° *M. candidus* ; 3° *M. luteus* ; 4° *M. candicans* ; 5° *M. versicolor* ; 6° *M. cinnabareus* ; 7° *M. cereus albus* ; 8° *M. fervidosus* ; 9° Coccus rouge (MASCHEK). — M. liquéfiant la gélatine : 10° *M. flavus liquefaciens* ; 11° *M. flavus desidens* ; 12° *Diplococcus luteus* ; 13° *Sarcina lutea*.

II. Bacilles ne liquéfiant pas la gélatine et non pathogènes : 1° *Bacillus fluorescens putidus* ; 2° *B. muscoides* ; 3° *B. scissus* ; 4° *B. can-*

1. *Zeitschrift für Hygiene*. Vol. X, 1891, pp. 225-252.

dicans ; 5° *B. diffusus ;* 6° *B. filiformis ;* 7° *B. luteus ;* 8° Bacille de l'eau fluorescent (Ehrenberg) ; 9° *B. viridis pallescens ;* 10° Bacterium fluorescent glauque I (Adametz) ; 11° *B. stolonatus ;* 12° *Bacterium Zürnianum ;* 13° *B. aerogenes.* — B. liquéfiant la gélatine et non pathogènes : 14° *B. ramosus liquefaciens ;* 15° *B. liquidus ;* 16° *B. mycoides* (Bacille radiciforme) ; 17° *B. subtilis ;* 18° *B. mesentericus fuscus ;* 19° *B. mesentericus vulgatus ;* 20° *B. fluorescens liquefaciens ;* 21° *B. ramosus ;* 22° Bacille jaune-citron (Frankland) ; 23° Bacille vert jaunâtre (Eisenberg) ; 24° *B. gasoformans ;* 25° Bacille gris (Maschek) ; 26° *B. prodigiosus ;* 27° *Proteus mirabilis ;* 28° *P. vulgaris ;* 29° *B. mesentericus vulgatus* (B. de la pomme de terre) ; 30° *B. cuticularis ;* 31° *B. albus :* pathogènes ; *B. œdematis maligni.* En outre, il y avait deux espèces non encore décrites et ne liquéfiant pas la gélatine (*Bacillus,* nos 1 et 2).

Le plus grand nombre des bactériacées rencontrées est du groupe des bacilles dont on a déterminé 34 espèces ; les coccus, moins nombreux, sont au nombre de 13 : on les a trouvés surtout à la surface et rarement dans les couches profondes.

Quant à l'abondance des diverses espèces, on peut dire qu'on a trouvé très abondamment, presque dans chaque essai, les organismes suivants rangés par ordre de fréquence : Bacilles nos 16, 17, 6, 20, 1, 7 ; Microc. 3 ; Bac. 28 ; Microc. 4, 2, 12 ; Bac. 29, 24, 10, 31, 4, si bien que, dans la série d'essais, le bacille 16 s'est montré le plus souvent et le bacille 4 est un des moins abondants. Se présentant plus rarement, c'est-à-dire pas sur chaque plaque, viennent les Microc. 10, 5, 1, 6, 7 ; Bac. 18, 19, 3, 5, 27, 2, 14, 8, 22, 11, 23, 12, 25, 9, 13. Quant aux Microc. 9, 11, 13, Bac. 21, 26, 30, ils ne se sont rencontrés qu'accidentellement, sur quelques exemplaires dans tout le cours de ces recherches poursuivies pendant plus d'un an.

En comparant les divers échantillons de la surface de ces sols, on voit qu'en moyenne ce sont les sols de prés et de bois qui offrent le mélange le plus bigarré de bactéries ; les sols de vigne et de champ ont une population plus homogène. On ne remarque pas de différence sensible dans les sortes de bactéries suivant la profondeur.

Les recherches continuées régulièrement montrent très nettement que certaines espèces apparaissent subitement en quantités tout à

fait anormales et disparaissent aussi vite pour être remplacées, soit par le mélange ordinaire de bactériacées, soit par une autre espèce devenant très prépondérante.

A 1 mètre de profondeur, les mucorinées existent encore souvent en grande quantité dans un sol naturel non labouré. Les levures s'y rencontrent fort rarement ; il est surprenant que le *Saccharomyces glutinis* s'y trouve encore à une profondeur de 1 à 2 mètres. Les sols provenant d'une grande altitude (Rosskopf, Schauinsland) avaient une population bactérienne beaucoup plus homogène que les sols cultivés. On y trouvait presque exclusivement le *B. subtilis* et le *B. mycoides ;* on aurait dit qu'on avait mélangé à dessein et cultivé sur plaques deux cultures pures de ces deux espèces.

Quant au nombre des germes des divers essais, on constate que, comparativement au grand nombre de bactériacées de la surface, il y a déjà une diminution sensible à 1 mètre de profondeur et cette diminution se fait brusquement.

Généralement à 1 mètre, le nombre des bactéries est, d'un seul coup, cent fois moindre. On remarque en outre que le nombre des bactériacées dans les zones superficielles des divers sols essayés varie suivant le mode de culture. C'est le sol de forêt qui accusa la plus grande pauvreté en germes, environ 600 000 par centimètre cube en moyenne ; puis vint le sol de vigne avec un taux moyen de 1 050 000 ; celui du sol de prairie fut sensiblement plus élevé : 1 400 000, et le sol cultivé en contenait plus encore : 1 500 000. Le plus fort nombre trouvé fut 6 000 000 ; le taux ne descendit pas, en général, au-dessous de 70 000. A une profondeur d'un mètre, le nombre était beaucoup plus faible. Dans la série en expérience, forêt, vigne, pré et champ, on trouva dans un centimètre cube, en moyenne, 128 000, 46 000, 134 000 et 330 000 germes. Comme les recherches ne purent avoir lieu régulièrement à de plus grandes profondeurs, on ne peut plus donner de résultats comparables. Le taux moyen à 2 mètres de profondeur fut de 17 000. On ne put trouver qu'une fois un sol exempt de germes. Naturellement les échantillons provenant de terrains rapportés possédaient un taux de germes notablement supérieur ; c'est ainsi qu'un centimètre cube de terre à 2 mètres de profondeur contenait environ 160 000 germes.

Les sols des hautes altitudes renfermaient encore moins de germes que n'en avaient donné la plupart des autres comptages. Tandis qu'au Rosskopf (739 mètres) on en trouva 200 000, le sol de Schauinsland (1 286 mètres) ne contenait que 100 000 bactériacées par centimètre cube.

Vu le petit nombre de recherches faites jusqu'ici, on ne peut poser de conclusions nettes, d'autant moins que les conditions nécessaires pour la présence et la multiplication des microbes sont soumises dans le sol à des variations extraordinaires et sont très différentes suivant les localités. Ainsi, à côté des organismes cités par Adametz et Fülles, beaucoup d'autres ont été trouvés dans les sols par d'autres bactériologistes [1] ; par exemple, dans certaines circonstances, on rencontre assez souvent d'assez grandes quantités de *B. butyricus, B. racemosus, B. thermophilus, B. viscosus*, etc. ; en outre, le *B. terrigenus* et, parmi les espèces pathogènes, avec le *B. œdematis maligni*, le bacille du tétanos, le *Staphylococcus pyogenes aureus*, le *Streptococcus septicus*, le *Bacillus septicus agrigenus*, le *Pseudoœdembacillus*.

L'influence de la couverture végétale et des modes de culture retentit de façons extrêmement diverses sur la présence des microbes. C'est dans le sol agricole travaillé que le nombre des germes est toujours le plus grand et les bactéries s'y trouvent en plus forte proportion que les mucorinées. Au contraire dans les sols non travaillés, où la décomposition des matières organiques se fait lentement, où s'accumulent d'assez grandes quantités d'humus acide comme dans les forêts, les prairies, les terrains fangeux, les bactéries cèdent le pas aux mucorinées, du moins dans les couches supérieures où l'air pénètre.

Dans les prairies tourbeuses et surtout dans la tourbe, les bactéries ne se présentent que disséminées ou manquent presque complètement.

Sur les bactéries nitrifiantes, qui doivent être ici traitées à part, les essais de R. Warington [2] surtout donnent des éclaircissements.

1. J. Eisenberg, *Bacteriologische Diagnostik*. 1891.
2. *Journ. of the Chem. Society*. 1884, vol. XLV, pp. 637-672.

Dans deux séries il trouva des organismes nitrifiants jusqu'à une profondeur de 46 centimètres (dans un cas, jusqu'à 91 centimètres), mais pas plus bas. Des recherches plus récentes du même auteur, faites d'après une méthode perfectionnée[1], ont montré que les bactéries nitrifiantes se rencontrent jusqu'à une profondeur de $1^m,50$ à $1^m,80$, mais exercent une influence d'autant plus faible et sont d'autant plus rares que les couches du sol dont elles proviennent sont plus profondes. Elles se comportent donc à cet égard comme les autres microbes.

Dans la nature, la nitrification n'est à considérer que dans les zones superficielles du sol, parce que les conditions de ce processus (facile accès de l'air, richesse en matières azotées) sont plus favorables que dans le sous-sol. Si cependant on trouve dans les eaux de drainage ou dans le sol à d'assez grandes profondeurs des quantités plus ou moins considérables de nitrates, on ne doit pas conclure qu'elles se sont formées là; elles proviennent principalement des couches supérieures et ont été entraînées dans les zones profondes par les eaux d'infiltration.

De toutes les observations faites jusqu'ici, il résulte que les organismes nitrifiants atteignent leur taux maximum, très variable du reste, dans les sols arables et dans tous ceux où l'air pénètre facilement, qu'ils manquent dans les sols de prés, de bois et de tourbe ou ne s'y trouvent que dans certaines conditions et seulement en petit nombre.

Déjà Boussingault[2] avait montré la grande pauvreté de la plupart des sols de forêt en nitrates; cette constatation fut confirmée par Chabrier[3], qui trouva que le taux du sol en nitrites et nitrates sous des épicéas était beaucoup plus faible que celui d'un sol cultivé de même nature. Schlœsing[4] ne put trouver trace de ces sels dans un sol boisé, tandis qu'un sol calcaire labourable en renfermait des quantités notables. De même, dernièrement, A. Bau-

1. *Ibid.* Vol. LI, 1887, pp. 118-129.
2. *C. R.*, 1857.
3. *C. R.*, t. LXXIII, 1871, pp. 186 et 1480.
4. *C. R.*, t. LXXIII, 1871, p. 1326.

MANN[1] n'a pas trouvé d'acide nitrique dans un sol de forêt, et les recherches d'E. EBERMAYER[2] dans les localités les plus diverses, choisies surtout dans les montagnes de Bavière, ont toujours montré que les sols forestiers et les sols tourbeux sont exempts de nitrates ou n'en renferment que des quantités extrêmement faibles, tandis que les sols de champs et de jardins qui avaient reçu du fumier, du purin, etc., accusaient généralement une grande richesse en ce précieux aliment des plantes.

Tous ces résultats autorisent à conclure que *dans les sols de prairies, de forêts et de tourbières, les organismes nitrifiants ne rencontrent pas d'ordinaire les conditions nécessaires à leur existence.*

A cette règle cependant, il y a des exceptions. Ainsi, dans beaucoup de prairies et de sols forestiers et tourbeux défrichés, on a trouvé des doses non négligeables de nitrates, et même GREBE[3] a déterminé un taux élevé de nitrate dans le sable d'une pineraie. Il faut en déduire que le manque de nitrate ou son peu d'abondance dans les sols précités est lié à une composition particulière de ces sols. Les travaux de A. MÜNTZ[4] nous apportent sur ce point des données précieuses.

MÜNTZ employa divers sols à réaction acide (terre de bruyère, tourbe) et neutre (sol de champ et de jardin); il leur ajouta des matières organiques animales (sang en poudre, cuir pulvérisé) et détermina, au bout d'un temps assez long, les quantités d'ammoniaque et de nitrate qui s'étaient formées. Voici les résultats :

AU BOUT DE 8 MOIS on trouve dans :	TERRE DE BRUYÈRE.		TERRE TOURBEUSE.	
	Ammoniaque. — milligr.	Acide nitrique. — milligr.	Ammoniaque. — milligr.	Acide nitrique. — milligr.
100 grammes de terre. . . .	2,5	0	2,1	0
100 grammes de terre avec cuir en poudre	28,9	0	21,1	0
100 grammes de terre avec sang en poudre	73,9	0	39,7	0

1. *Ueber die Bestimmung des im Boden enthaltenen Ammoniakstickstoffs und über die Menge des assimilirbaren Stickstoffs im unbearbeiteten Boden.* (*Habilitationsschrift.* 1886.)

2. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung,* par LOREY et LEHR. Août 1888.

3. *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen.* Fasc. 19, 1885, p. 157.

4. *C. R.*, t. CX, 1890, p. 1206.

	Durée de l'essai. 11 jours. — Sol de champ.		65 jours. — Sol de jardin.	
	milligr.	milligr.	milligr.	milligr.
100 grammes de terre . .	0,1	7,0	0,9	24,4
100 grammes de terre avec cuir en poudre	0,9	312,6	25,2	135,6
100 grammes de terre avec sang en poudre	1,1	281,1	23,9	99,3

Ces chiffres semblent établir suffisamment que, dans tous les cas où les sols montrent une réaction acide, il ne se forme pas de nitrate, et que les sols de cette nature (c'est le cas de la plupart des sols de prairie, de forêt et de tourbière) n'offrent pas un milieu favorable aux organismes nitrifiants. Grebe a montré qu'il y a des exceptions à cette règle ; toutefois elles ne se présentent que dans des cas où le sol n'a pas de réaction acide.

Résumons les résultats des recherches consignées dans ce chapitre :

1° *Le sol renferme en quantités variables de nombreux microorganismes (jusqu'à 6 000 000 par centimètre cube) qui sont des bactériacées, des levures et des mucorinées.*

2° *Ces organismes n'existent que dans les couches supérieures du sol, et déjà à 1 mètre de profondeur leur nombre diminue beaucoup ; il est nul à 2 mètres dans la plupart des cas.*

3° *Généralement, les bactéries sont les plus nombreuses, puis viennent les mucorinées ; les levures ne se présentent qu'à l'état sporadique.*

4° *Les bactériacées sont principalement représentées par divers bacilles ; les micrococcus sont bien moins nombreux et n'ont été observés avec quelque abondance que dans les couches supérieures du sol.*

5° *Dans les sols à réaction acide (prairies, forêts, tourbières), les bactériacées sont supplantées par les mucorinées, et les organismes nitrifiants ne peuvent vivre.*

4. — Les microorganismes sur les substances organiques en décomposition.

Les restes de plantes ou d'animaux qui entrent en décomposition à la surface du sol sont, tout comme le sol lui-même, habités par des organismes extrêmement nombreux. Ce n'est pas seulement d'après les rapports bien connus des microorganismes avec la série des combinaisons des matières organiques qu'on peut parler ainsi, c'est aussi d'après diverses observations encore insuffisantes d'ailleurs pour pouvoir indiquer exactement les espèces qui habitent les différentes substances.

On a trouvé sur les fèces : *Bacillus aerogenes, B. subtilis, B. thermophilus, B. muscoides, B. putrificus coli,* les bacilles de Bienstock, *B. coprogenes fœtidus, B. Zopfii,* etc. Ces espèces ont été aussi en grande partie observées sur le fumier et autres matières en décomposition, surtout animales, avec *Bacillus saprogenes, B. mesentericus fuscus, B. butyricus, B. fluorescens liquefaciens, B. fluorescens putidus, B. erythrosporus, B. janthinus, Proteus vulgaris, P. mirabilis,* etc.

Les zones de fumier où l'air pénètre hébergent divers hyphomycètes, parmi lesquelles on doit citer : *Pilobolus crystallinus* Tode, *Mortierella Rostafinskii* Brefeld, *Coprinus stercorarius* Bulliard, *Sordaria minuta* Fuckel, *S. Brefeldii* Zukal, *S. curvula* de Bary, *S. decipiens* Winter, *S. pleiospora, S. Wiesneri, Thamnidium elegans* Link, *Ascobolus pulcherrimus* Crouan, *A. denudatus* Fr., *A. furfuraceus* Persoon, *Syncephalis cordata* Van Tieghem et Le Monnier, *Ascodesmis nigricans* Van Tieghem, diverses espèces de *Saccobolus*[1].

Dès que les matières organiques en décomposition ont une réaction acide, comme c'est le cas, par exemple, pour l'humus brut (*Rohhumus*) des forêts, ce sont des champignons plus différenciés qui interviennent surtout ; on voit partout dans le sol forestier leur mycélium abondamment développé. D'après Nægeli, ce sont les hyphomycètes, encore peu étudiés, qui contribuent essentiellement à

1. Comparer W. Zopf, *Die Pilze*. Breslau, 1890.

produire les matières colorantes foncées de l'humus. P. E. MÜLLER[1] a décrit dans les couches d'humus brut des forêts un type de *Cladosporium* qui forme des filaments de teinte foncée très résistants (fig. 43). D'après FRÜH, ce champignon est absolument caractéristique pour les dépôts d'humus brut (*Rohhumus*). [Voir la 2e partie.]

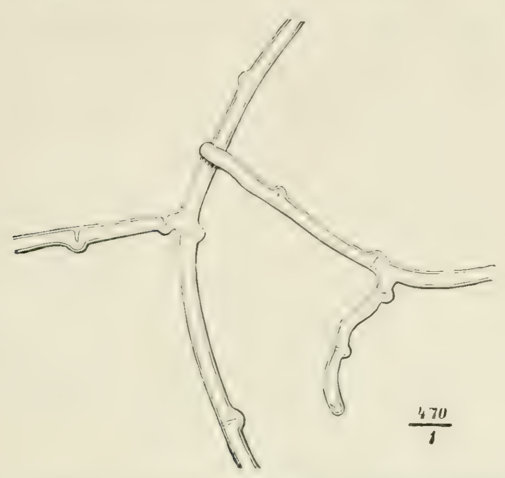


FIG. 43. — *Mycélium du* Cladosporium humifaciens ROSTR. (D'après MULLER.)

La participation de ce mycélium aux processus de décomposition n'a pas encore été étudiée de près. Il n'est pas douteux du reste que dans les couches un peu épaisses d'humus acide s'installent les mucorinées ordinaires.

5. — Les microorganismes sur les plantes.

Sur les plantes et dans les infusions végétales, on a signalé : *B. mesentericus fuscus, B. mesentericus vulgatus, B. prodigiosus, B. butyricus, B. megatherium* (voir *Note A*), *B. subtilis, B. tumescens*, etc.

Dernièrement, E. BRÉAL[2] a trouvé un ferment dénitrifiant sur la paille, le foin de luzerne, les tourteaux de maïs, etc. (voir p. 52).

1. *Studien über die natürlichen Humusformen.* Berlin, 1887.
2. *Annales agronomiques,* t. XVIII, n° 4, pp. 181-195.

CHAPITRE VI

CONDITIONS D'EXISTENCE DES MICROORGANISMES

Les organismes inférieurs ont, comme les plantes plus élevées en organisation, des exigences déterminées vis-à-vis des facteurs extérieurs de la végétation ; et la connaissance de ces exigences offre le plus haut intérêt, puisqu'on peut acquérir par elle une vue nette des réactions assez compliquées qui se succèdent dans la nature et des mesures pratiques à employer[1]. Pour la mise en jeu de ces réactions qui constituent la vie des cellules, il faut avant tout qu'il se dégage une certaine somme d'énergie, sans laquelle la vie de l'organisme est impossible. Cette énergie est fournie par les transformations qui s'effectuent dans les organismes inférieurs, où, d'abord, grâce au protoplasma vivant, les combinaisons compliquées se résolvent en plus simples, en donnant comme produit constant de l'acide carbonique. A côté de ce processus (respiration intramoléculaire) qui n'exige pas d'oxygène et qui est dans la plante la cause première de la production d'énergie, il en est un autre, avec intervention de l'oxygène, qui est nécessaire (quand l'énergie dégagée uniquement par les transformations internes est insuffisante) pour satisfaire complètement aux besoins de la plante. Pour couvrir le déficit d'énergie, il faut de puissantes oxydations. Mais le dégagement de force qui en résulte est réglé moins par la quantité d'oxygène mise à la disposition que par les décompositions dans le protoplasma (par la respiration intramoléculaire) qui excitent et qui gouvernent l'absorption d'oxygène.

Chez beaucoup d'organismes inférieurs (bactériacées), la faible somme d'énergie dégagée par la respiration intramoléculaire est suffisante pour l'exercice des fonctions vitales, ou bien ces organismes

1. On a surtout utilisé pour la rédaction de ce chapitre l'ouvrage détaillé de C. Flügge, *Die niederen Organismen*. Leipzig, 1886.

ont la faculté d'extraire l'oxygène de certaines combinaisons et de l'employer pour leur oxydation. « Dans le plus grand nombre des cas, la respiration intramoléculaire ne suffit pas d'ailleurs d'une manière durable à satisfaire à la consommation d'énergie des bactériacées, mais elles peuvent se passer d'oxygène tant qu'il y a un succédané approprié. Ce succédané est fourni notamment par la fermentation, dans laquelle une forte quantité de matière se détruit à la surface du milieu nutritif, de manière à rendre libre une somme d'énergie équivalente à celle que dégage l'oxydation. La fermentation peut donc suppléer à l'oxygène.

« Absorption d'oxygène et fermentation doivent être considérées comme deux faits équivalents quant à leur action sur la vie des champignons inférieurs. » (Flügge.)

A côté de la respiration qui exige, qu'elle se fasse avec ou sans oxygène, un afflux incessant de matériaux nutritifs destinés à la décomposition et à l'oxydation, il y a, en outre, dans les cellules un processus d'assimilation auquel incombe la tâche de transformer les aliments absorbés en combinaisons appropriées, soit à des dédoublements ultérieurs, soit à la croissance et à la multiplication de l'organisme et qui possède dès lors un caractère essentiellement différent du processus de la respiration. La décomposition des matières organiques sous l'action des végétaux inférieurs est réglée (pas exclusivement) par les réactions dont il vient d'être question dans le protoplasma (respiration intramoléculaire et oxydation), mais chez certaines espèces elle est encore favorisée par la séparation de ferments (*Enzymes*) qui sont des composés organiques complexes, solubles, facilement décomposables et pouvant transformer des quantités relativement grandes d'autres matières organiques. Il se forme de cette façon des combinaisons qui sont solubles, diffusibles et peuvent servir d'aliments. C'est ainsi que le *Bacillus subtilis* et beaucoup d'autres bactéries liquéfiant la gélatine nutritive produisent un ferment qui transforme en peptone l'albumine insoluble. Le *Bacillus butyricus* et le *Spirillum Rugula* en sécrètent un autre qui dissout la cellulose ou encore, dans les produits formés par maintes espèces de bactéries, se rencontre une diastase qui transforme l'amidon en divers glycoses (maltose, dextrose, etc.). On

doit citer aussi les ferments produisant l'inversion du saccharose, du lactose et du maltose en dextrose, galactose et lévulose et dont la présence a été observée aussi bien chez certaines moisissures (*Aspergillus* et *Penicillium*) que chez les levures et beaucoup de schizomycètes. Le ferment de l'urine qui dédouble l'urée en carbonate d'ammoniaque et l'acide hippurique en glycocolle et acide benzoïque provient de même de certains organismes décrits plus haut.

Les réactions provoquées par les ferments sont essentiellement différentes de celles qui se passent dans les fermentations reposant sur la respiration intramoléculaire. « Les ferments sont des composés chimiques, solubles, qui ne sont pas nécessairement liés à des organismes vivants et qui peuvent réaliser seulement des séparations par hydrolyse, tandis que dans la fermentation proprement dite il y a des modifications compliquées dans le groupement des atomes, lesquelles supposent la présence constante, l'intervention immédiate d'organismes vivants. La comparaison des circonstances extérieures favorables et défavorables dans les deux processus fait le mieux ressortir leur différence essentielle : les ferments solubles agissent avec leur maximum d'intensité vers 60° et dans un milieu acide ; d'assez fortes doses d'acide carbolique, d'essence de térébenthine n'affaiblissent presque pas leur action : dans les mêmes conditions nous observons toujours un arrêt complet de la vie ou de l'activité fermentative de tous les microorganismes. » (Flügge.)

Résumons brièvement les conditions d'existence des trois groupes d'organismes distingués plus haut.

1. — Conditions d'existence des mucorinées ou hyphomycètes[1].

Les mucorinées réclament essentiellement pour l'organisation de leurs tissus des matières organiques carbonées et azotées, de l'eau et des principes minéraux. Des substances albuminoïdes surtout peptonisées, des amides (leucine, tyrosine, asparagine), des hydrates de carbone (notamment les sucres), des acides organiques (tar-

1. Nous rappelons encore que nous considérons ici ces deux termes comme synonymes.

trique, citrique, succinique, acétique, etc.), sont, avec les phosphates et sulfates alcalins ou alcalino-terreux, les principales sources d'alimentation pour les mucorinées.

L'ammoniaque et les nitrates ne leur fournissent de l'azote que s'il y a dans le substratum un composé organique non azoté, ou si l'ammoniaque y est en combinaison avec des acides organiques.

L'eau est de grande importance pour les mucorinées : elle entre dans la composition de leurs tissus, elle sert de moyen de dissolution ou de transport, et remplace l'eau évaporée. La végétation des mucorinées n'est luxuriante que si le substratum leur offre, outre les aliments nécessaires, une dose assez élevée d'humidité ; elle diminue avec le dessèchement du substratum et cesse quand le taux d'eau descend au-dessous de certaines limites.

Les mucorinées sont incomparablement plus indifférentes que les saccharomycètes et les schizomycètes à la concentration du milieu nutritif; elles prospèrent encore dans un milieu dont le taux d'éléments solubles serait trop faible pour permettre à ces dernières de vivre. Pourtant il y a aussi une limite qui ne saurait être dépassée sans que le développement en souffre.

La réaction du milieu nutritif est d'une importance particulière pour la bonne végétation des mucorinées. Un excès d'alcali est nuisible, non pour toutes, mais pour la plupart, tandis qu'elles prospèrent à merveille en présence des acides, pourvu que ceux-ci ne soient pas en excès, ce qui serait dommageable ; c'est l'opposé des schizomycètes qui, en général, sont entravés dans leur développement ou tués quand le milieu nutritif a une réaction acide.

Suivant les circonstances, les mucorinées peuvent, à l'aide de ferments qu'ils sécrètent, rendre solubles des matières organiques insolubles, comme cela a été démontré, par exemple, pour le *Penicillium* et l'*Aspergillus niger,* qui produisent un ferment intervertissant le sucre de canne et le maltose.

La dissolution, souvent observée, de la cellulose par des mucorinées ayant pénétré dans des organes végétaux doit être aussi attribuée à l'influence de ferments.

L'oxygène atmosphérique, sans lequel les mucorinées ne peuvent vivre, a pour elles une énorme importance. A cet égard, elles sont,

suivant l'expression de Pasteur, aérobies et ne se trouvent abondamment que là où existent, avec les aliments et l'humidité nécessaires, des quantités suffisantes d'oxygène. C'est pour cela qu'on les observe surtout à la surface des substances en décomposition ou bien dans celles de leurs zones qui sont pénétrées par l'oxygène. Quelques mucorinées (*Mucor*) ont la faculté, une fois plongées dans les solutions et soustraites ainsi à l'influence de l'air, de développer des bourgeons comme les levures, et ces bourgeons se développent normalement et fructifient quand ils sont amenés à la surface par la fermentation qu'ils occasionnent.

Chez les mucorinées comme chez tous les autres organismes, les réactions vitales sont sous la dépendance de la température.

C'est par une température moyenne déterminée (optimum) qu'elles se font le plus énergiquement; leur intensité diminue quand la température décroît (elle devient nulle pour un minimum donné), ou quand, au contraire, elle dépasse l'optimum en s'élevant jusqu'à un point (maximum) où les réactions cessent. Ce point cardinal de l'action de la température et particulièrement le minimum et le maximum au delà desquels la vie s'arrête n'ont pas encore été déterminés pour la plupart des espèces. Les voici pour le *Penicillium glaucum :*

MINIMUM.	OPTIMUM.	MAXIMUM.
2°	22°	43°

Pour l'*Aspergillus glaucus,* l'optimum est 12°, le maximum 30°; pour l'*A. niger,* l'optimum est à 34°-35°. Autant qu'on peut en juger maintenant, les limites de température sont différentes pour chaque espèce, si bien que ce facteur fait souvent pencher la balance en faveur de telle ou telle espèce. Ainsi ADAMETZ a trouvé qu'en semant un mélange de spores, le *Penicillium glaucum,* aux températures inférieures à 12°, l'emportait sur les mucorinées, tandis qu'à des températures plus élevées (20°-25°) le même milieu nutritif se couvrait d'une abondante végétation de mucors qui étouffaient les petites colonies de *Penicillium*. Mentionnons aussi que les limites de température pour les diverses fonctions (germination, formation du mycélium, fructification) sont différentes pour une seule et même espèce. D'après FRÆNKEL, le mycélium de l'*Aspergillus fumigatus,*

par exemple, végète encore vers 51°-52°, mais il ne peut fructifier à cette température. La formation des spores ne commence que quand la température à laquelle est soumis le champignon descend à 37°.

La germination des spores est liée à la présence d'une dose d'humidité suffisante, d'oxygène libre et d'une température convenable. Les matières nutritives nécessaires pour le développement du tube germinatif sont empruntées à la spore elle-même.

2. — Conditions d'existence des levures.

Relativement à leurs exigences alimentaires, les levures se comportent comme les mucorinées avec cette seule différence qu'en raison de leur taux plus élevé d'azote, il leur faut plus de matières azotées et sous une forme convenable, car elles ne peuvent utiliser l'azote des nitrates. Elles supportent moins bien que les mucorinées une assez forte concentration du milieu nutritif, et les combinaisons nourrissant mal ne peuvent être employées que très diluées, tandis que le sucre, même à la dose de 35 p. 100 dans la solution nutritive, n'arrête pas la végétation des levures. Quant à la réaction du substratum, les levures montrent une grande sensibilité vis-à-vis de l'alcali en excès, mais, d'autre part, elles supportent une réaction acide ; il y a pourtant une limite au delà de laquelle celle-ci commence à avoir une influence nuisible, moindre que pour les mucorinées.

Les exigences des levures au point de vue de l'oxygène sont très différentes de celles des mucorinées : ces exigences se précisent par ce fait que la croissance et la multiplication de ces organismes semblent plus actives sous l'influence de l'oxygène, lequel devient inutile dès qu'on place les levures dans des conditions où elles peuvent fermenter activement. Si ce n'est pas le cas, la multiplication cesse et ne reprend que s'il survient des quantités suffisantes d'oxygène libre. De cette propriété spéciale il résulte que les levures peuvent végéter dans l'intérieur des substances, en l'absence d'air, à condition qu'elles puissent développer une fermentation.

La température est aussi un facteur important pour le développement des levures ; elle offre, comme pour tous les autres organis-

mes, un minimum, un optimum et un maximum. L'optimum semble être à 25°-30°, le maximum à 53° et le minimum à quelques degrés au-dessus de 0°. L'accroissement dépend essentiellement de la composition du milieu nutritif, suivant qu'elle permet une fermentation plus ou moins intense. Tant que les aliments offerts sont de quantité et de forme telles que l'activité des cellules peut persister sans trouble, la multiplication par bourgeonnement continue ; si les conditions d'alimentation deviennent défavorables, elle s'interrompt et le champignon se met à former des spores pour assurer son existence.

Pour la germination des spores, il faut tout d'abord le concours de l'oxygène, de l'humidité et d'une certaine température : les aliments sont superflus dans les premiers temps, parce que les premiers bourgeons se forment aux dépens des matières de réserve accumulées dans les spores.

3. — Conditions d'existence des bactériacées.

Leurs exigences nutritives sont extraordinairement diverses : tandis qu'aux unes il faut de grandes quantités de certaines matières albuminoïdes et un substratum nutritif de composition bien déterminée, d'autres admettent une assez grande variété dans leur alimentation, mais prospèrent seulement quand le milieu nutritif renferme des combinaisons organiques complexes. Même au point de vue de leurs exigences relativement à une concentration plus ou moins accusée de l'aliment, on constate chez les diverses bactéries des différences très importantes.

En général, les aliments des bactériacées ressemblent à ceux des mucorinées. Des matières albuminoïdes diffusibles, des combinaisons amidées, des sucres, des sels alcalins, des acides organiques, sont ce qui convient le mieux à la plupart d'entre elles. Les sels ammoniacaux sont moins favorables, mais sont pourtant mieux supportés par elles que par les levures. Les bactériacées peuvent aussi prendre leur azote aux nitrates ; cependant, cette réduction semble être un phénomène provoqué par des produits de dédoublement et de fermentation et ne faisant qu'accompagner les réactions intimes chez les bactéries. (Flügge.) Celles-ci peuvent se préparer elles-

mêmes des aliments utilisables, en sécrétant des ferments qui solubilisent diverses matières insolubles.

D'après les recherches de WINOGRADSKY, les bactéries nitrifiantes s'écartent, sous le rapport de la nutrition, de tous les autres microorganismes en ce qu'elles peuvent assimiler le carbone de l'acide carbonique. Si cette observation se vérifiait, elle conduirait à renoncer à l'opinion actuellement admise qu'une synthèse complète de substances organiques par des êtres vivants, indépendamment de la lumière solaire, est impossible, ou, du moins, il ne faudrait plus lui attribuer qu'une valeur limitée. (Voir *Note B.*)

Les bactériacées sont extrêmement sensibles à un excès d'acidité du milieu nutritif; dans ces conditions, elles périssent généralement. Par contre, leur multiplication et leur activité sont favorisées par une faible alcalinité du substratum. Elles se séparent essentiellement par là des mucorinées, qui, on l'a vu plus haut, offrent le caractère contraire. Il y a cependant des exceptions; certaines espèces, comme le *Bacillus aceticus* et le *B. butyricus*, non seulement supportent sans dommage une forte acidité, mais même, comme le champignon du vinaigre, ne prospèrent que dans des milieux nutritifs avec excès d'acide. Un excès d'alcalinité est alors nuisible à ces espèces. Beaucoup de champignons (*Micrococcus ureæ, M. ureæ liquefaciens, Bacillus ureæ*) supportent un degré très élevé d'alcalinité ; d'autres manifestent une telle indifférence pour la réaction du milieu, qu'on les voit commencer leur développement dans un milieu acide et le continuer avec un excès d'alcali provoqué par les transformations de leurs éléments. (FLÜGGE.)

D'ailleurs, la plupart des bactériacées, comme les mucorinées et les levures, ne peuvent se développer ou ne s'accroissent que fort peu dans un milieu nutritif où le taux, soit d'acide, soit d'alcali, dépasse certaines limites, ou bien qui renferme une solution saline trop concentrée, de quelque nature qu'elle soit.

Quant au besoin d'oxygène, on doit, d'après P. LIBORIUS[1], diviser les bactéries en trois classes :

1° *Anaérobies obligatoires,* dont toutes les fonctions ne peuvent

1. *Zeitschrift für Hygiene.* Vol. I, 1886, p. 115.

s'exercer qu'en l'absence d'oxygène ; quelques-unes provoquent des fermentations ; d'autres se multiplient sans fermentation ; mais pour les premières, la fermentation n'est nullement une condition indispensable de leur multiplication. L'arrivée de l'oxygène arrête toutes les manifestations extérieures de la vie chez ces bactéries. A ce groupe appartiennent, par exemple, *Bacillus butyricus, B. denitrificans II, B. muscoides, Spirillum Rugula* (*Bacterium termo*) ;

2° *Anaérobies facultatives* : ce sont celles qui végètent aussi vigoureusement que possible en présence de grandes quantités d'oxygène, mais qui consomment encore une portion notable de la matière nutritive en l'absence complète d'oxygène et qui augmentent encore sensiblement, bien qu'un ralentissement dans la croissance coïncide avec la cessation de l'arrivée de l'oxygène. Dans l'état actuel de nos connaissances, on doit compter dans ce groupe : *Bacillus acidi lactici, B. erythrosporus, B. candicans, B. putrificus coli, B. mycoides, B. stolonatus, B. aerogenes*. Mais il peut se faire qu'on doive y faire rentrer une longue série d'espèces ; c'est ce que l'on doit conclure de l'observation de Nægeli que les bactéries aérobies végètent en l'absence de l'air et peuvent se multiplier, si elles se trouvent dans des conditions qui leur permettent de provoquer une active fermentation.

Beaucoup de bactériacées exercent des actions différentes sur le substratum, suivant qu'elles sont obligées de vivre avec ou sans air. Du moins le fait a été démontré pour le *Bacillus mycoides* (p. 47) qui, s'il se développe en aérobie dans les solutions d'albumine, brûle l'albumine en donnant naissance à de l'ammoniaque, tandis que dans les solutions sucrées de nitrate, en l'absence d'air, il brûle le sucre et emprunte l'oxygène qui lui est nécessaire aux nitrates facilement réductibles. Il peut se faire que d'autres bactéries aient semblable propriété ;

3° *Aérobies obligatoires* : ce sont celles qui, en toutes circonstances, ont besoin d'une dose abondante d'oxygène ; quand elle est trop restreinte, toutes les manifestations vitales s'arrêtent ; aucune de ces bactéries ne donne lieu à des fermentations nettement déterminées.

Chaque phase de la végétation est sous la dépendance de la température du milieu ambiant ; les bactéries n'échappent pas à cette loi.

D'après ce qu'on vient de voir, elles ont une large marge pour les

fonctions de nutrition et un optimum de température très élevé pour leur accroissement. Le *Bacterium termo*, par exemple, peut végéter entre 5° et 40° ; son optimum est à 30°-35°. D'après FITZ, le *Bacillus butyricus* a son optimum à 40° et son maximum à 45°. Pour le *Bacillus aceticus*, l'optimum gît entre 20° et 30° ; au-dessous de 10°, il se développe très lentement, de même au delà de 35°, le maximum est à quelques degrés plus haut.

BREFELD a trouvé que la végétation du *Bacillus subtilis* est très lente à 6° ; qu'à 12°,5, il s'écoule entre les débuts de chaque nouvelle partition 4-5 heures ; à 25°, 3/4 d'heure ; à 30°, une demi-heure. Les températures nécessaires à la germination semblent être plus élevées, du moins pour quelques espèces. Nombre de bactéries peuvent sans périr outrepasser à un tel degré les limites inférieures de température, qu'on peut bien dire qu'elles n'en ont pas à l'égard de la végétation. La limite supérieure après laquelle la mort survient est à peu près la même pour les cellules végétatives de la plupart des bactéries que pour la plupart des cellules végétatives des autres plantes, c'est-à-dire vers 50°-60°. Quelques-unes résistent même à des températures de plus de 100°.

La formation des spores chez les bactériacées paraît dépendre des mêmes conditions que chez les levures et les mucorinées, en ce sens que la multiplication des cellules par partition se continue tant que les aliments sont à un état convenable ; mais, si le milieu nutritif se détériore ou s'épuise, l'organisme forme des spores ; c'est en général un fait rare dont les conditions ne sont pas encore suffisamment éclaircies, non plus que pour la germination des spores, à propos de laquelle on sait seulement qu'il faut un certain taux d'eau, une température assez élevée, différente pour chaque espèce et, pour la plupart, la présence de l'oxygène. C'est seulement chez les anaérobies obligatoires que cette dernière condition ne paraît pas nécessaire à la germination des spores, sans qu'elle lui nuise cependant.

4. — Concurrence entre les mucorinées, les levures et les bactériacées.

La présence simultanée sur un seul et même substratum d'individus des trois groupes principaux que nous avons distingués ou de

diverses espèces d'un même groupe développe une concurrence dans laquelle dominent ou même règnent exclusivement ceux qui, dans le cas donné, rencontrent les circonstances les plus favorables à leur développement et à leur multiplication. Dans un cas, ce sera la composition chimique du milieu nutritif ou sa concentration ou sa réaction ou son taux d'humidité qui aura l'influence prépondérante; dans un autre, ce sera l'accès de l'air, la température, etc. Ainsi, pour citer quelques exemples, dans un mélange acide, assez pauvre en eau, où l'air pénètre, les mucorinées ou les levures auront le dessus, tandis que les bactériacées seront plus ou moins complètement supplantées; celles-ci, au contraire, l'emporteront si le substratum a une concentration plus faible, une composition alcaline, un taux d'eau assez élevé et si l'accès de l'air est limité ou complètement suspendu.

Il peut y avoir aussi concurrence entre diverses espèces d'un seul et même groupe, concurrence dans laquelle interviennent, pour déterminer soit la prédominance, soit l'annihilation de l'une ou l'autre espèce, d'autres conditions que la composition du milieu nutritif. La température, par exemple, peut avoir une influence prépondérante. Si l'on sème un mélange de spores de *Penicillium* et d'*Aspergillus*, à basse température, ce sera le *Penicillium* qui envahira tout le milieu nutritif; avec une plus forte chaleur, ce sera l'*Aspergillus*.

Ces exemples suffisent à montrer que, dans la nature, les divers microorganismes influent sur leurs substratums de façons extrêmement variables, suivant les conditions d'existence qui leur sont offertes. Comme celles-ci sont très différentes pour chaque espèce et se modifient en outre continuellement, il n'est pas étonnant que le développement de chaque organisme aussi bien que les processus chimiques qu'il provoque soient sujets à de perpétuelles variations; aussi la découverte des réactions qui se passent dans la nature, notamment des causes premières des phénomènes dans les cas concrets, est-elle un des plus difficiles problèmes de la biologie.

CHAPITRE VII

CONDITIONS DE LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Après avoir jusqu'ici exposé les faits qui montrent l'intervention des organismes inférieurs dans les processus de décomposition, il faut maintenant parler des conditions auxquelles ces processus sont soumis *in specie*. Comme ils sont régis par l'activité de ces microorganismes, on pourrait, il est vrai, conclure *à priori* que le cycle de ces réactions correspond aux exigences biologiques des êtres qui les provoquent, comme on l'a montré ci-dessus ; mais on se ferait ainsi une idée insuffisante des circonstances décisives, d'un côté parce que l'influence des facteurs varie de mille manières qui doivent être exposées en détail, et, de l'autre, parce que certaines conditions qui n'ont été qu'indiquées jusqu'ici jouent un rôle important dans la décomposition des matières organiques. Si, dans ce qui va suivre, il n'est question que de l'érémacausis et de la putréfaction, cela tient uniquement à ce que ces deux processus sont du plus haut intérêt pour l'agriculture, tandis que les autres modes de décomposition sont beaucoup moins importants et ont été exposés plus haut. (Voir p. 66-109.)

1. — Conditions de l'érémacausis.

a) *État physique et chimique des matières organiques.*

En ce qui concerne la décomposition en plein air, l'état de la matière organique est de grande importance ; car l'intensité de cette décomposition dépend à un haut degré tant de la quantité, de la concentration et de l'état de division de la matière que de sa composition chimique et de son degré d'altération.

A) **Quantité et concentration de la matière.** — Pour déterminer l'influence qu'ont sur la décomposition des taux divers de matières organiques, j'ai fait quatre mélanges de sable quartzeux (380 grammes) avec différentes proportions de fumier de cheval en poudre (5, 10, 15 et 20 grammes), je les ai humectés avec 40 grammes d'eau et placés dans des tubes en U plongeant dans un bain-marie à 30°. L'acide carbonique dégagé en vingt-quatre heures était mesuré chaque jour d'après la méthode de v. Pettenkofer. La moyenne de six déterminations a donné :

	MATIÈRE ORGANIQUE.			
	5 gr.	10 gr.	15 gr.	20 gr.
1er *essai :*	—	—	—	—
Moyenne du volume d'acide carbonique dans 1000 d'air. . .	**41,000**	**54,112**	**56,598**	**57,550**
Rapport	1	1,32	1,38	1,40
2e *essai :*				
Volume moyen.	**24,689**	**42,359**	**48,054**	**51,098**
Rapport	1	1,72	1,95	2,07

On voit que le taux d'acide carbonique de l'air du sol qui, à circonstances extérieures égales, peut servir à mesurer l'intensité de la décomposition s'accroît, il est vrai, avec la dose de matière organique, mais dans une proportion bien moindre que la matière, si bien qu'au delà de certaines limites (15 grammes de matière organique dans le cas précédent), on n'observe pas un dégagement d'acide carbonique sensiblement plus fort. Ce fait ne tient pas du tout à ce que, dans les essais précédents, l'oxygène nécessaire à la décomposition aurait fait défaut ; car, après défalcation de l'acide carbonique dégagé dans les deux essais, il restait encore une quantité d'air largement suffisante.

Suivant toute vraisemblance, cette particularité doit être attribuée aux propriétés antiseptiques de l'acide carbonique, ainsi que H. Kolbe[1] l'a démontré. *Quand cet acide carbonique s'est accumulé dans la matière en décomposition au delà d'un certain taux, l'activité des microorganismes et, par suite, l'oxydation du carbone de*

---

1. *Journal für praktische Chemie.* Neue Folge, vol. XXVI, 1882, p. 149-155.

cette matière diminue. Plus le taux d'acide carbonique s'élève, plus l'intensité de la décomposition s'affaiblit.

Cette règle s'applique aussi à la nitrification des matières azotées. Déjà Leone[1] avait remarqué que, pour une teneur un peu forte en matière organique, non seulement la nitrification est interrompue, mais que même les nitrates et les nitrites formés pouvaient se transformer en ammoniaque.

D'après des essais récents du même auteur[2], ce résultat obtenu d'abord avec des solutions est vrai aussi pour le sol ; de fortes fumures de matière organique mènent à une destruction de nitrates et de nitrites, ce qui n'arrive pas avec une fumure faible.

Dernièrement, P. Pichard[3] a étudié à fond cette question et a démontré que la quantité *absolue* d'acide nitrique formé croissait à la vérité avec l'augmentation de l'azote organique dans la matière, mais que sa quantité *relative* (en pour-cent de l'azote existant) diminuait considérablement, tandis que la production d'ammoniaque est exactement proportionnelle au taux d'azote de la substance organique. Il en résulte ce fait très important dans la pratique que le taux absolu d'ammoniaque formée augmente avec celui de l'azote organique dans la matière en décomposition, tandis que celui de l'acide nitrique diminue. D'après Pichard, on peut admettre que la nitrification est active tant que la substance renferme 1 gramme d'azote organique par kilogramme, mais qu'au delà de cette limite elle décroît sensiblement au profit de la production d'ammoniaque.

Cette influence défavorable à la nitrification tient peut-être à ce que l'augmentation de matière organique entraîne la production d'une plus forte quantité d'acide carbonique qui gêne l'activité des microorganismes. On pourrait aussi, pour l'explication de ce fait, alléguer cette circonstance que le carbonate d'ammoniaque formé agit défavorablement sur le ferment nitrique ; mais cette explication

1. *Gazetta chimica italiana,* vol. X, p. 505.

2. *Atti della R. Accademia dei Lincei,* ser. IV, *Rendiconti,* vol. VI. Roma, 1890, p. 33-35.

3. *C. R.*, t. CXIV, p. 81-84 ; *Annales agronomiques,* t. XVIII, p. 108-119.

ne saurait être mise en avant pour les essais de Pichard, parce que la terre y renfermait assez de sulfate de chaux pour transformer le carbonate d'ammoniaque. C'est seulement au cas où la quantité de chaux est insuffisante que l'influence du carbonate d'ammoniaque vient probablement s'ajouter à celle de l'acide carbonique (voir ci-après F, p. 183).

P. P. Dehérain[1] a montré que la nitrification des sels ammoniacaux était fort influencée par leur quantité. 20 grammes de terre placés dans une soucoupe furent additionnés de doses diverses de sulfate d'ammoniaque ou laissés tels quels et mis sous une cloche où l'air circulait. Du 27 septembre au 15 octobre 1884, il s'y forma les quantités suivantes de nitrates (en milligrammes) :

	ACIDE NITRIQUE formé. 1	2
Terre telle quelle	12,20	13,5
Terre avec 0gr,010 d'azote sous forme de sulfate d'ammoniaque	10,03	9,7
— 0gr,030 — —	4,50	2,2

Non seulement le sulfate d'ammoniaque ajouté n'avait pas été nitrifié, mais il avait empêché la nitrification de l'azote contenu dans le sol sous forme organique, et d'autant plus que la quantité de sel ajoutée était plus grande. Comme la terre employée était assez sèche, l'auteur voulut savoir si les choses se passeraient de même dans un sol très humide. Il prit un sol de jardin renfermant 32 p. 100 d'eau. Pendant trente-six jours, 100 grammes de ce sol auquel on ajouta diverses doses de sulfate d'ammoniaque formèrent les quantités suivantes de nitrates :

AZOTE AJOUTÉ sous forme de sulfate d'ammoniaque. — grammes.	ACIDE NITRIQUE produit en 36 jours. — grammes.	ACIDE NITRIQUE PRODUIT par 100 kilogr. de terre par jour. — grammes.
0,020	0,075	22,0
0,040	0,070	20,0
0,060	0,060	17,0
0,080	0,042	12,0
0,100	0,013	3,8

1. *Annales agronomiques,* t. XIII, 1887, p. 241-261.

Une notable partie de l'azote de l'ammoniaque a été nitrifiée, mais les quantités de nitrates formées ont été d'autant plus faibles que la dose de sel ammoniacal était plus forte. Si l'on compare ces résultats avec ceux de l'essai précédent, on voit que l'humidité du sol est d'un haut intérêt pour la nitrification de l'ammoniaque : elle est bien plus intense dans un sol humide.

Le degré de concentration des solutions nitrifiantes (urine, sels ammoniacaux) est aussi un facteur extrêmement important dont l'action s'exerce suivant une loi qui n'est que faiblement influencée par le concours d'autres circonstances. Les résultats de J. Soyka[1] le prouvent :

	p. 100.	
Accès de l'air limité.		
Urine pure. . . .	100	L'acide nitrique n'a pas encore paru au bout de 4 mois.
Urine étendue à. .	50	
— . .	10	Apparu au bout de 36 jours.
— . .	1	— 22 —
En l'absence de l'air.		
Urine pure. . . .	100	Pas d'acide nitrique après 4 mois.
Urine étendue à. .	50	
— . .	10	Il y a de l'acide nitrique après 7 jours.
— . .	1	— — 4 —

Les recherches de R. Warington[2] sur les sels d'ammoniaque ont aussi prouvé que la nitrification commence toujours d'abord dans la solution la moins concentrée et qu'il y a sans doute pour chaque solution un degré de concentration au delà duquel la nitrification est impossible. On peut donc soit favoriser ce processus dans une large mesure, soit l'empêcher complètement, au moins pour un temps assez long.

Il s'agit ici de faits analogues à ceux que l'on constate quand on augmente peu à peu la proportion d'air.

B) Répartition et degré de finesse de la matière. — Pour déterminer expérimentalement l'influence du degré de finesse et de la

1. *Zeitschrift für Biologie,* vol. XIV, 1878, p. 449-482.
2. *Journal of the chemical Society,* vol. XLV, p. 637-682.

répartition de la matière organique sur sa décomposition, j'ai employé[1] de la tourbe pulvérisée séparée par des tamis en lots de diverses grosseurs et de la paille de pois, soit broyée, soit hachée en fragments de 1 à 5 centimètres de long.

Dans l'essai I, 40 grammes de poussière de tourbe ont été mélangés à 370 grammes de sable quartzeux et 75 grammes d'eau ; dans l'essai II, on a employé les mêmes quantités, mais avec 40 grammes d'eau seulement. Quant à l'essai III installé à l'air libre dans un cylindre en tôle d'une contenance de 50 litres, on mélangea d'une manière bien homogène 383 grammes de paille de pois à 61 grammes de sol riche en humus.

Ces matières ont dégagé les quantités suivantes d'acide carbonique qui sont les moyennes de quatre déterminations (essai I), de trois (essai II) et de douze (essai III) :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air du sol.

	GRAIN DE LA TOURBE.			
	0mm,0-0mm,25.	0mm,25-0mm,50.	0mm,50-1mm,0.	1mm,0-2mm,0.
I. .	17,069	15,682	15,703	13,773
II. .	54,537	48,336	39,718	41,484
III. .	Sol sans paille :	Avec paille de pois pulvérisée :	Avec paille en fragments de 1 centimètre :	Avec paille en fragments de 5 centimètres :
	4,046	11,004	12,058	11,254

De ces chiffres il semble résulter que *les matières organiques difficilement décomposables* (*tourbe*) *se décomposent d'autant mieux qu'elles sont en éléments plus fins et, par suite, mieux mélangés, tandis que, pour les substances facilement décomposables* (*paille de pois*), *la finesse des grains est sans importance*. Dans le premier cas, l'influence de l'état de division s'explique par ce fait que, plus les grains sont fins, plus l'oxydation est facilitée. Dans le second cas, il faut sans doute prendre en considération la porosité plus grande de la matière et sa composition chimique plus favorable à la nutrition des microorganismes.

---

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 273.

Il est donc avantageux de pulvériser les engrais qui n'ont qu'une très faible aptitude à la décomposition. A ce groupe appartiennent, par exemple, certains engrais animaux (cornes, sabots, poils, déchets de laines) : les rognures de cuir, la matière organique des os bruts, etc. Par la transformation de ces substances en poudre de corne, de laine, de cuir, d'os, etc., leur altérabilité est sensiblement augmentée ; en général, cette opération est suivie de plus d'effet si la texture de la masse est rendue poreuse par des moyens plus énergiques, tels que la torréfaction, la cuisson en vase clos sous forte pression ou l'attaque par l'acide sulfurique. C'est ainsi que, d'après mes recherches, la cuisson en vase clos à une pression de trois atmosphères a exercé une très heureuse influence sur la décomposition du cuir et de la corne. Voici l'acide carbonique contenu dans 1 000 volumes d'air et rapporté à 1 gramme de carbone. (Les chiffres suivants sont la moyenne de six dosages.)

	TAUX de carbone.	POIDS correspondant à 1 gr. de carbone.	ACIDE CARBONIQUE produit.
	—	—	—
	p. 100	grammes.	
Poudre de cuir brute	48.82	2,05	9,507
— après cuisson .	47.90	2,09	14,457
Poudre de corne brute. . . .	45.40	2,20	6,119
— après cuisson .	45.34	2,25	8,509

On voit qu'après cuisson la matière s'est décomposée plus facilement. La torréfaction des déchets de corne et le traitement par l'acide sulfurique de certaines substances, telles que les déchets de laine, exercent la même action heureuse.

C) **Degré de décomposition de la matière organique.** — Comme les substances prises à divers stades de décomposition ont un taux de carbone différent, qui augmente avec l'âge (voir p. 22) et que, par suite, en employant d'égales quantités de ces matières pour déterminer leur aptitude relative à la décomposition, on ne pourrait faire de comparaisons valables, j'ai, dans les essais cités plus haut [1], dosé d'abord le carbone de la substance et pris pour base une quan-

1. *Journ. f. Landw.*, 34e année, 1886, p. 273.

tité renfermant 1 gramme de carbone. La portion pesée fut toujours intimement mélangée dans une capsule de porcelaine à 400 grammes de sable quartzeux pur et à 50 centimètres cubes d'eau distillée. Le mélange fut aussitôt introduit dans des tubes en U plongeant dans un bain-marie à 30°. De cette façon, on obtenait dans tous ces essais comparatifs l'identité de toutes les circonstances extérieures. Pour rendre comparables les résultats obtenus, il n'y avait plus qu'à faire les dosages à des intervalles de temps égaux. Pour cela, le mélange des matières et le remplissage des tubes furent faits pour chaque essai de 8 à 10 heures du matin; les tubes furent laissés dans le bain-marie pendant vingt-quatre heures exactement, au bout desquelles avait lieu la première prise d'air comprenant chaque fois 2 litres aspirés en deux heures; l'opération était donc terminée pour 10-12 heures du matin. Tous les autres jours on opéra de même. La décomposition des matières se mesure par le dégagement des quantités ci-après d'acide carbonique :

		TAUX de carbone p. 100[1].	Pour 1 gr. de carbone il faut	VOLUME de CO^2 dans 1000 volumes d'air[2].
Fumier de vache	frais	24.16	4,14	13,431
	vieux de 8 semaines	30.27	3,33	11,706
	vieux de 20 semaines	34.51	2,89	8,248
Fumier de mouton	frais	35.94	2,78	10,390
	à demi décomposé	37.05	2,69	8,043
Tourbe (Cunrau)	de $10^{cm},5$ à $36^{cm},8$ de profondeur.	40.03	2,49	3,229
	de $42^{cm},1$ à $73^{cm},6$ —	43.09	2,32	3,052
	de $78^{cm},9$ à $115^{cm},7$ —	43.25	2,30	2,827
Tourbe (Donaumoos)	de $0^{m},0$ à $0^{m},2$ de profondeur	40.12	2,49	2,934
	de $0^{m},2$ à $0^{m},5$ —	42.64	2,34	2,724
	de $0^{m},5$ à $0^{m},8$ —	42.80	2,33	2,545
	de $0^{m},8$ à $1^{m},1$ —	44.05	2,27	2,394
	de $1^{m},1$ à $1^{m},4$ —	45.24	2,21	2,262

De ces chiffres on doit conclure que *les matières organiques se décomposent d'autant plus difficilement que leur altération est plus avancée*. Les fumiers de vache et de mouton ont fourni d'autant

1. Ces nombres se rapportent à la matière séchée à l'air.

2. Moyenne de six dosages.

moins d'acide carbonique qu'ils étaient plus vieux. De même, son dégagement diminue, dans la tourbe, à mesure que l'on s'adresse à des couches plus profondes, c'est-à-dire plus décomposées. L'exactitude de ce point est démontrée aussi par ce fait, constaté dans presque tous les essais, que le dégagement d'acide carbonique est le plus violent au début, puis diminue constamment pendant le cours de l'expérience.

On comprend aisément que l'oxydation du carbone dans les matières organiques non décomposées soit plus forte au début qu'après et plus forte aussi que dans les matières primitivement identiques par leur composition, mais déjà en train de s'altérer, si l'on observe que la provision latente d'énergie chimique des matières en question est d'autant plus grande qu'elles renferment plus de corps aussi voisins que possible des combinaisons formées dans les plantes sous l'action de la vie. Si des corps non altérés, c'est-à-dire ayant leur maximum d'affinité pour l'oxygène, sont soumis aux facteurs de la décomposition, ils dégageront dès le début la plus grande quantité d'acide carbonique. Quand cette première explosion est terminée, la production d'acide va constamment en décroissant jusqu'à ce qu'il n'y ait plus que des restes organiques à forme d'humus qui, par suite de leur constitution, s'oxydent lentement et contribuent à peine à la production du gaz carbonique.

L'azote des principes azotés des matières organiques se comporte comme le carbone. Ainsi il résulte des recherches de A. Morgen [1] sur la décomposition des poudres de corne et de cuir que presque tout l'azote s'était transformé dans les huit premiers jours de la putréfaction, puisque la proportion avait toujours été plus faible. Les essais de C. F. A. Tuxen [2] montrent d'une manière éclatante que les choses se passent dans l'érémacausis comme dans la putréfaction. Des cylindres en terre vernissée furent remplis de 5 kilogr. soit de lehm, soit de lehm argileux. Pour se rapprocher le plus possible des conditions naturelles, on ajouta à ce dernier assez d'engrais pour

1. *Landwirthschaftliche Versuchsstationen*, vol. XXVI, 1880, p. 51-72.

2. *Undersögelser vedrörende de Krälstofholdige Gjödningsstoffers Omdannelse i Jordbunden. Tiedsskrift for Landökonomie*, 1884.

élever le taux d'azote à 2 p. 100 (calculé sur le sol séché à 100°). Ce taux correspondait à peu près à celui du lehm (1.8 p. 100). La terre fut maintenue humide afin de se placer dans les circonstances les plus favorables à la transformation des engrais azotés, mais on empêcha la saturation en faisant écouler l'eau en excès tout en tenant compte naturellement de l'acide nitrique qu'elle contenait. Le dosage initial de l'azote sous forme d'ammoniaque et d'acide nitrique servit de point de départ et de comparaison.

Voici les résultats obtenus :

Azote sous forme d'ammoniaque et d'acide nitrique exprimé en centièmes de l'azote ajouté.

DATES.	LEHM PLUS				SABLE LEHMEUX PLUS				AZOTE
	Rien.	Poudre d'os.	Guano de poisson.	Fumier de cheval.	Rien.	Poudre d'os.	Guano de poisson.	Fumier de cheval.	sous forme
1er juin 1880	0.80	1.35	2.55	1.25	0.10	1.32	2.55	2.55	d'ammoniaque.
	0.40	0.65	0.55	0.45	0.25	0.35	0.30	»	d'acide nitrique.
1er juillet	0.45	51.45	55.10	3.53	0.20	50.00	38.20	3.25	d'ammoniaque.
	0.80	2.75	1.40	4.43	0.15	1.00	0.35	1.92	d'acide nitrique.
1er septembre	1.25	8.70	7.82	8.00	»	35.55	19.45	8.51	d'ammoniaque.
	1.50	63.00	50.00	3.11	0.25	19.05	21.55	1.98	d'acide nitrique.
1er novembre	0.40	5.50	5.86	9.02	»	19.40	7.50	»	d'ammoniaque.
	1.15	46.25	36.55	23.91	0.10	27.65	23.30	8.07	d'acide nitrique.
20 avril 1881	»	4.10	6.20	1.31	»	20.40	12.65	5.21	d'ammoniaque.
	2.65	46.25	42.56	21.20	0.10	63.00	29.85	4.91	d'acide nitrique.
20 juin	0.30	7.10	10.80	7.97	0.15	21.10	13.65	23.00	d'ammoniaque.
	0.80	61.55	43.35	21.00	0.15	64.50	26.15	34.09	d'acide nitrique.
1er septembre	0.55	1.90	9.50	5.00	0.15	2.70	1.80	12.76	d'ammoniaque.
	1.00	65.65	50.00	28.00	0.25	66.65	39.35	61.20	d'acide nitrique.

Abstraction faite du sol non fumé et du sol fumé avec du fumier de cheval, on voit nettement pour les autres que la transformation des éléments azotés des engrais (poudre d'os et guano de poisson) se fait incomparablement plus vite au début de la décomposition que plus tard. Déjà au bout d'un mois, 50 p. 100 de l'azote primitif étaient transformés en ammoniaque qui, plusieurs mois après, de-

venait de l'acide nitrique. Il y a donc deux réactions successives, d'abord formation d'ammoniaque, ensuite oxydation de cette ammoniaque en acide nitrique.

L'azote de l'humus du sol non fumé n'a subi qu'une modification très lente ; celui du fumier de cheval se comporte différemment ; il contient évidemment divers principes azotés ; sa transformation est plus facile et plus rapide dans le sable lehmeux que dans le lehm, où il paraît y avoir en automne un temps d'arrêt dans la décomposition qui reprend au printemps avec une nouvelle activité.

D) **Composition chimique de la substance**. — La décomposition des matières organiques est surtout réglée au point de vue chimique par leur taux en composés complexes (principes albuminoïdes, amidés), par la solubilité de ces composés, par leur taux de matières minérales et par la présence de substances capables d'atténuer l'action des facteurs extérieurs.

Toutes circonstances égales, le taux d'azote des matières organiques a, dans certaines limites, une influence tout à fait prédominante sur la décomposition. On voit déjà que les parties végétales pauvres en azote et riches en cellulose (paille des céréales) se décomposent plus lentement que celles qui sont riches en azote et pauvres en cellulose (paille des légumineuses). Les chiffres suivants provenant de mes essais prouvent le fait.

	TAUX de carbone p. 100.	Pour 1 gr. de carbone il faut	VOLUME de CO^2 dans 1000 volumes d'air [1].
	—	—	—
Tiges de soja.	39.75	2,52	**23,673**
— pois.	40.75	2,45	**22,156**
— féverole	39.84	2,51	**22,076**
Paille d'orge de mars.	41.43	2,41	**19,562**
— de maïs.	40.74	2,45	**18,837**
— de blé de mars.	42.54	2,35	**18,560**
— de seigle de mars.	41.95	2,38	**18,189**
— d'avoine de mars	39.97	2,50	**17,388**
— de seigle d'hiver	43.36	2,90	**15,936**

1. Moyenne de six dosages.

Si les feuilles des végétaux se décomposent aussi plus vite que leurs tiges et leurs racines, comme le montre le tableau suivant, cela tient également à ce que ces organes sont plus riches en azote.

		TAUX de carbone p. 100.	Pour 1 gr. de carbone il faut	VOLUME de CO^2 dans 1000 volumes d'air[1].
Soja	feuilles	38.42	2,60	24,294
	tiges	41.08	2,43	23,052
	racines	39.38	2,54	22,061
Féveroles	feuilles	38.52	2,59	24,734
	tiges	43.27	2,31	19,809
	racines	41.99	2,38	19,293
Seigle d'hiver	feuilles	42.10	2,37	18,211
	tiges	43.05	2,32	17,019

Dans les essais que j'ai faits spécialement pour élucider le rôle des matières azotées[2], j'ai placé diverses sortes de pailles réduites en poudre, soit dans l'eau, soit dans une solution d'albumine (provenant de blanc d'œuf) à 1 p. 100 environ ; après les avoir fait macérer à basse température pendant quarante-huit heures, je les ai desséchées sur du papier à filtre à la température de la chambre. J'ai mélangé 4 grammes de la matière ainsi préparée avec 400 grammes de sable quartzeux j'ai humecté le mélange avec 40 grammes d'eau et l'ai placé alors dans les tubes en U. Le dégagement d'acide carbonique (moyenne de six ou huit déterminations) a été :

Volume de CO^2 dans 1000 volumes d'air.

Paille de seigle	macérée dans l'eau	10,611
	— la solution d'albumine	13,812
Paille de maïs	macérée dans l'eau	19,492
	— la solution d'albumine	22,115
Paille de seigle	macérée dans l'eau	6,946
	— la solution d'albumine	11,559

1. Moyenne de six dosages.
2. *Journ. f. Landw.*, XXIV, 1886, p. 287.

On remarque nettement que *la décomposition des matières organiques est favorisée par une augmentation du taux d'albumine.*

Cette relation entre l'aptitude des matières à la décomposition et leur teneur en azote s'explique par ce fait que l'azote joue un grand rôle dans l'alimentation des microorganismes. On serait néanmoins mal fondé à tirer de ces faits la conclusion que le taux d'azote des matières organiques détermine étroitement leur faculté de décomposition. Cette opinion serait en contradiction avec l'observation, souvent constatée, que des matières particulièrement riches en azote, comme la corne, la tourbe, etc., ne se décomposent qu'avec une lenteur extrême.

En scrutant de plus près les causes de ces faits, on se convainc qu'outre l'état mécanique de la matière et son taux en principes azotés, la forme de ces principes et les autres éléments constitutifs de la matière en question influent sur son aptitude à la décomposition.

La corrélation entre cette aptitude et le taux d'azote se vérifie seulement quand les éléments azotés sont facilement altérables, comme c'est le cas pour la plupart des matières albuminoïdes et quelques combinaisons azotées aisément décomposables (urine, sucs digestifs). Ceci est vrai non seulement pour l'oxydation du carbone, mais encore pour la formation de l'ammoniaque et des nitrates. Mais les substances organiques renferment, en outre, des combinaisons azotées plus ou moins difficilement décomposables encore inconnues en général dans leur constitution intime. Si elles existent en assez grande proportion dans la matière, celle-ci, malgré son fort taux d'azote, se décomposera plus lentement qu'une autre ayant une moindre proportion de principes azotés plus facilement altérables.

Les recherches précitées de Tuxen et Morgen démontrent que la transformation des matières azotées en éléments nutritifs assimilables présente déjà de grandes divergences, ce qui fait présumer que, suivant leur constitution chimique, elles seront aussi diversement prédisposées à la décomposition.

Dans les essais de Tuxen, l'azote de la poudre d'os et du guano de

poisson, par exemple, s'est montré bien plus soluble que celui du fumier de cheval et MORGEN a trouvé que la matière azotée de la corne en poudre se dissolvait plus facilement que celle du cuir en poudre. Comme autre preuve citons l'observation de P. P. DEHÉRAIN[1] d'après laquelle les matières azotées du fumier nitrifiaient plus facilement que celles des tourteaux de maïs et du sol arable ; c'est dans ce dernier que la nitrification se faisait le plus lentement. A. STUTZER et W. KLINGENBERG[2] ont proposé, pour déterminer l'efficacité de l'azote en combinaison organique, de traiter les engrais organiques azotés (poudre d'os, de sang, de corne, de cuir, guano de poisson, excréments, poudrette, engrais verts, tourbe, etc.), par une solution digestive, telle que le chlorhydrate de pepsine. Ils choisirent cette matière, qui digère l'albumine, parce que les principes azotés des os, du sang, etc., sont très voisins de l'albumine et que des essais préalables avaient donné de meilleurs résultats qu'avec le suc intestinal, qui dissout également l'albumine. On ne peut naturellement pas affirmer que les données acquises par cette méthode soient directement applicables à la décomposition dans le sol des matières organiques azotées et que la dissolution s'y fasse exactement de la même façon, mais les processus sont analogues, et le procédé en question peut établir d'une manière approchée la valeur relative des diverses formes d'azote combiné.

D'après ces recherches, il semble y avoir, dans les engrais comme dans les fourrages, deux groupes de composés azotés nettement distincts, l'un soluble, l'autre insoluble dans la pepsine. La nature de ce dernier groupe est encore à établir ; ces auteurs admettent qu'il doit son origine à la nucléine. Ce principe extrêmement réfractaire se rencontre, plus ou moins modifié, dans presque toutes les matières animales ou végétales, et même l'azote de la tourbe, ainsi qu'une grande partie de celui du sol, devraient être rapportés en dernière analyse, d'après ces auteurs, à la nucléine qui existait primitivement dans les plantes.

---

1. *Annales agronomiques,* t. XIII, 1887, p. 241-261.
2. *Journal für Landwirthschaft,* 30e année, 1882, p. 263-270.

Voici les valeurs moyennes obtenues dans ces essais :

DÉSIGNATION DES ENGRAIS.	AZOTE total.	SUR 100 PARTIES, la pepsine dissout.	ne dissout pas.
Sang desséché et pulvérisé	13.54	89.75	10.25
Déchets de cuir en poudre	6.91	39.19	60.81
Corne en poudre, grillée	13.70	40.73	59.27
— brute râpée	7.06	23.43	76.57
Poudrette de Liernu, traitée par le borax . .	6.77	80.23	19.77
— non traitée par le borax.	6.77	83.36	16.64
Poudrette de Metz.	1.58	22.92	77.08
Déchets de laine.	10.55	2.72	97.28
Poudre d'os brute	4.02	95.45	4.55
	3.94	97.95	2.05
Poudre d'os soumise à la vapeur	4.31	92.74	7.26
	2.43	88.35	11.65
Guano brut du Pérou, traité par le borax. .	11 08	94.53	5.47

Les grandes différences que ces chiffres dévoilent dans la solubilité de l'azote des diverses substances concordent généralement avec les données de la pratique sur l'efficacité des engrais. Elles se trouvent aussi, à peu d'exceptions près, en accord avec les valeurs que j'ai obtenues pour l'aptitude à la décomposition[1].

Parmi les éléments accessoires des matières organiques qui influent sur la décomposition, il y a surtout à considérer les résines, les cires, les graisses et les tannins. La présence des résines est particulièrement importante dans la tourbe.

La lenteur avec laquelle la tourbe s'altère tient non seulement à l'état peu soluble de ses composés azotés, mais aussi à sa teneur en matières résineuses et tanniques. Les matières résineuses, solubles dans le mélange d'alcool et d'éther, existent souvent en proportion notable et d'autant plus forte que la tourbe est plus ancienne. Quand ces résines enveloppent la substance organique, elles empêchent l'action directe des facteurs de décomposition, particulièrement

1. Dans la poudre d'os traitée par la vapeur il y a relativement moins d'azote dissous que dans la poudre brute, parce que les matières azotées, facilement solubles, ont été extraites des os lors du traitement. Cet inconvénient est compensé par certains avantages (pulvérisation plus parfaite et par suite action plus rapide).

l'arrivée de l'eau et de l'air, et, par suite, ralentissent singulièrement cette décomposition. C'est ce que montre une expérience spéciale que j'ai faite sur de la tourbe de Schleisheim [1]. Le taux de résine s'élevait à 5.12 p. 100. Il s'est dégagé :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

	TOURBE	
	pure.	traitée par l'alcool et l'éther bouillants.
	—	—
Moyenne de quatre dosages . . .	25,995	50,651

Il s'ensuit que *la résine est un obstacle à la décomposition de la tourbe.*

La lenteur de la décomposition de certaines substances d'origine organique employées comme engrais a été souvent attribuée à la matière grasse qu'elles contenaient, sans que cette opinion ait été appuyée sur des chiffres.

Pour faire cette preuve, j'ai pris [2] divers engrais riches en matière grasse, notamment du guano de Fray-Bentos (formé de déchets de viande), de la poudre de viande, de la poudre d'os, des aiguilles d'épicéa et de pin pulvérisées, des tourteaux de colza ; une partie fut laissée telle, l'autre fut privée de sa matière grasse par l'éther. Dans les essais I et II, les prises d'essai commencèrent quand l'éther fut complètement évaporé, ce qui exigeait quatre à cinq jours. Mais lorsqu'on vit que, contrairement aux idées reçues, la portion débarrassée de la matière grasse se décomposait plus lentement que la substance fraîche et que ce résultat était peut-être dû à l'action antiseptique de l'éther, on laissa, dans les essais III et IV, les échantillons traités par l'éther exposés à l'air libre pendant deux mois avant de les soumettre à la décomposition. Pour plus de sûreté, on plaça dans les mêmes conditions des échantillons non traités.

Dans chaque essai, la quantité de substance employée était de 4 grammes, qu'on mélangeait à 400 grammes de sable quartzeux

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 289.
2. *Ibid.*, 1886, p. 292.

et qu'on humectait avec 40 grammes d'eau. Le tout, mis dans des tubes en U, était traité suivant la méthode plusieurs fois décrite.

Voici les résultats des dosages de l'acide carbonique.

Volume de CO^2 dans 1000 volumes d'air.

	Sans sa matière grasse.	Avec sa matière grasse.	Sans sa matière grasse.	Avec sa matière grasse.	Sans sa matière grasse.	Avec sa matière grasse.
	Poudre d'os.		Guano de Fray-Bentos.		Poudre de viande.	
I. Moyenne de six dosages . .	20,037	21,279	28,001	27,184	24,577	25,967
	Tourteau de colza.		Aiguilles d'épicéa.		Aiguilles de pin.	
II. Moyenne de six dosages . .	15,732	18,989	7,381	10,058	9,899	12,086
	Tourteau de colza.		Aiguilles d'épicéa.		Aiguilles de pin.	
III. Moyenne de neuf dosages. .	17,312	17,719	7,852	8,277	11,339	10,738
	Poudre d'os.		Guano de Fray-Bentos.		Poudre de viande.	
IV. Moyenne de huit dosages. .	19,476	22,165	20,941	24,670	21,999	22,799

Ces chiffres montrent, presque sans exception, que *l'extraction des matières grasses, au lieu de favoriser la décomposition, l'a au contraire entravée.* Bien que les différences dans les dosages ne soient pas très grandes, elles sont pourtant nettes. Il est difficile de décider expérimentalement si le traitement par l'éther a amené des modifications chimiques qui diminuent l'aptitude à la décomposition, ou si cette diminution est due aux propriétés antiseptiques de l'éther. Si l'on s'en tient aux résultats précédents, on pourrait conclure qu'on n'active pas la décomposition des engrais riches en matière grasse en les en débarrassant par le sulfure de carbone ou la benzine, comme on l'a proposé souvent dans ces derniers temps. Étant donné que les matières expérimentées sans traitement préalable ont accusé un très fort dégagement d'acide carbonique, il est juste d'admettre que la matière grasse est à peu

près sans influence sur la décomposition des substances qui en sont imprégnées.

Pour beaucoup de matières, telles que la tourbe, le cuir, les feuilles d'arbre, etc., le taux de tannin semble influer fortement sur la décomposition. Ces tannins sont par eux-mêmes extrêmement instables et enclins à s'altérer, mais avec les principes albuminoïdes ils forment des composés très résistants. Pour le montrer, j'ai broyé[1] finement des pailles de seigle d'hiver, de maïs, des feuilles de soja, je les ai fait macérer soit dans l'eau, soit dans des solutions tanniques de concentration diverse pendant quarante-huit heures, puis dessécher à la température de la chambre. Après les avoir mélangées à du sable et à d'égales quantités d'eau, je les ai soumises à la décomposition dans des tubes en U, à une température de 30°. La moyenne de six dosages d'acide carbonique a été la suivante :

Volume de CO^2 dans 1000 volumes d'air.

	MACÉRÉ	
	dans l'eau.	dans une solution de tannin à 1 p. 100.
Paille de seigle d'hiver. . . .	10,611	6,457
Paille de maïs	19,492	13,435
Feuilles de soja.	28,115	12,596

	MACÉRÉ				
	dans l'eau.	dans une solution de tannin			
		à 1 p. 100.	à 2 p. 100.	à 4 p. 100.	à 8 p. 100.
Feuilles de soja . . .	21,565	19,907	19,008	18,052	16,029

Ces chiffres montrent que *la décomposition des matières organiques est sensiblement ralentie par la présence du tannin.*

J'ai cherché à déterminer[2] dans quelle mesure la décomposition est influencée par les principes minéraux que renferment les matières organiques ; pour cela j'ai fait bouillir deux échantillons de tourbe et de sol riche en humus pesant respectivement 75 grammes

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 288.
2. *Ibid.*, 1886, p. 252.

et 300 grammes, l'un avec de l'acide chlorhydrique étendu, l'autre avec de l'eau distillée ; après dessiccation, je les ai humectés avec 80 grammes d'eau et j'ai dosé les quantités d'acide carbonique qui se dégageaient à 30° pendant vingt-quatre heures en présence de l'air. Voici les nombres trouvés :

Volume de CO^2 dans 1000 volumes d'air.

	SOL RICHE en humus bouilli		TOURBE BOUILLIE	
	avec acide chlorhydrique.	avec eau.	avec acide chlorhydrique.	avec eau.
	—	—	—	—
Moyenne de cinq dosages.	**11,342**	**50,658**	**8,037**	**35,904**

Donc *les échantillons dépouillés par l'acide chlorhydrique de leurs principes minéraux solubles ont dégagé une quantité beaucoup plus faible d'acide carbonique que ceux qui sont restés inaltérés.*

Pour mieux éclairer ces faits, je fis encore deux essais où j'ajoutai à des mélanges artificiels de sols des solutions nutritives contenant par litre $0^{gr},4$ de tartrate d'ammoniaque, $0^{gr},2$ de phosphate de potasse (KH^2PO^4), $0^{gr},2$ de chlorure de potassium, $0^{gr},1$ de sulfate de magnésie et $0^{gr},1$ de nitrate de chaux. Le taux de cette solution correspondait donc à 0.1 p. 100. J'employai aussi une solution de concentration double (0.2 p. 100).

Dans l'essai I, le mélange consistait en 400 grammes de sable quartzeux, 4 grammes de paille de seigle d'hiver pulvérisée, le tout arrosé de 40 centimètres cubes d'eau ou des susdites solutions ; dans l'essai II il y avait 400 grammes de sable quartzeux, 4 grammes de poussière de tourbe et 60 centimètres cubes de solution. Voici les quantités d'acide carbonique dégagées à 30° :

Volume de CO^2 dans 1000 volumes d'air.

	EAU.	SOLUTION	
		à 0.1 p. 100.	à 0.2 p. 100.
	—	—	—
Essai I.	**16,672**	**20,256**	**20,400**
Essai II.	**6,833**	**7,872**	**8,612**

Ces deux expériences concordantes montrent que l'oxydation du

carbone des matières organiques est sensiblement favorisée par l'addition d'une solution diluée renfermant tous les principes nutritifs, sans doute parce qu'en présence de composés facilement assimilables (tartrate d'ammoniaque, matières organiques azotées) les microorganismes intervenant dans la décomposition sont mieux nourris et pullulent davantage.

E) **Décomposition des matières organiques employées comme engrais.** — Les détritus animaux et végétaux employés comme engrais présentent les plus grandes différences dans leur aptitude à la décomposition, suivant leur composition physique et chimique, parfois aussi suivant des causes encore inconnues. Pour avoir une idée approchée de ce qui se passe à cet égard, j'ai pulvérisé les différents engrais[1], j'en ai pris des quantités correspondant à 1 gramme de carbone, je les ai mélangées avec 400 grammes de sable quartzeux et 50 centimètres cubes d'eau et les ai soumises à la décomposition dans des tubes en U, dosant chaque jour pendant six jours par la méthode de Pettenkofer l'acide carbonique dégagé en vingt-quatre heures. La moyenne des six dosages peut donner une idée de l'aptitude relative des diverses substances à la décomposition.

Le tableau ci-dessous indique ces moyennes.

MATIÈRES.	TAUX de carbone.	Pour 1 gramme de carbone il faut	VOLUME d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.
—	—	—	—
	p. 100		
Poudre d'os soumise à la vapeur	9.24	10,82	**31,769**
Guano de poisson	27.52	3,63	**28,453**
Poudre de viande	37.59	2,66	**27,528**
Fumier d'oie	43.43	2,30	**27,949**
— de pigeon	29.49	3,39	**26,716**
— de poule.	33.16	3,01	**25,379**
Guano du Pérou	16.67	5,99	**24,855**
Paille de soja	39 75	2,52	**23,673**
— de pois	40.75	2,45	**22,156**
— de féverole.	39.84	2,51	**22,076**
— d'orge de printemps	41.43	2,41	**19,562**

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 274-282.

MATIÈRES.	TAUX de carbone.	Pour 1 gramme de carbone il faut	VOLUME d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.
—	—	—	—
Paille de maïs	40.74	2,45	18,837
— de blé de printemps	42.54	2,35	18,560
— de seigle de printemps	41.95	2,38	18,189
— d'avoine de printemps	39.97	2,50	17,388
Fanes de pommes de terre	34.73	2,88	17,956
Sang pulvérisé	45.95	2,18	17,122
Paille de seigle d'hiver	43.36	2,30	15,936
Fumier de porc frais	30.09	2,32	14,901
— de cheval, à moitié décomposé	39.73	2,51	12,166
— de vache, frais	24.16	4,14	13,431
— de mouton, frais	35.94	2,78	10,390
Poudre de cuir, brute	48.82	2,05	9,507
Aiguilles de pin	48.22	2,08	9,936
Feuilles de chêne	43.20	2,31	9,421
— de hêtre	49.22	2,03	8,424
Poudre de corne, brute	45.40	2,20	7,170
Sciure d'épicéa	44.12	2,27	5,284
Tourbe (Cunrau), couche supérieure	40.03	2,49	3,229
Tourbe (Donaumoos), couche supérieure	40.12	2,49	2,934

En les rangeant par groupes, on voit que la poudre d'os, le guano de poisson, la poudre de viande, les excréments des oiseaux de basse-cour se décomposent le plus facilement. Après, viennent les pailles employées pour litière et les fumiers. Les cuirs et cornes en poudre et la couverture des forêts se détruisent plus difficilement, mais c'est pour la sciure et enfin la tourbe que le phénomène est le plus lent.

Les différences que l'on constate entre les nombres de la troisième colonne du tableau ne peuvent donner qu'une idée approchée du phénomène, d'abord parce que les matières n'ont pas été employées dans leur état naturel, mais pulvérisées, ensuite parce que l'aptitude plus ou moins grande des excréments et fumiers à la décomposition dépend aussi bien de l'alimentation que du degré d'altération de la masse ; et, à ce propos, on peut faire ressortir que les fumiers désignés comme frais étaient déjà probablement entrés en décomposition ; on n'a pas pu le vérifier parce qu'ils venaient de points éloignés.

En s'appuyant sur les données précédentes, ainsi que sur d'autres observations et sur les résultats de la pratique, on peut, à propos de la décomposition des matières organiques employées comme engrais, affirmer que *tous les détritus animaux, à quelques exceptions près, se décomposent plus facilement que les végétaux, qu'il s'agisse de l'oxydation du carbone ou de la production d'ammoniaque et de la nitrification*. On vient de voir que la poudre d'os et de viande, le guano de poisson, les fientes des oiseaux de basse-cour, le guano du Pérou s'altèrent plus vite que les autres matières d'origine végétale.

Il y a, d'ailleurs, dans la décomposition des détritus animaux de grandes différences que nous allons brièvement examiner.

Les produits azotés de désassimilation (urée, acide hippurique, acide urique soit dans l'urine, soit dans les fientes d'oiseaux, principes azotés des sucs digestifs rejetés dans les excréments) sont ceux qui se transforment le plus vite : les portions des excréments qui proviennent des aliments non digérés sont plus rebelles ; suivant leur taux d'azote et leur état physique, elles présentent de grandes différences. Les excréments de l'homme, des pigeons et des poules se décomposent ordinairement beaucoup plus vite que ceux des canards et des oies qui sont plus aqueux et moins azotés. Ceux des chevaux et des moutons, vu leur taux relativement élevé d'azote, leur pauvreté en eau, leur état poreux les rendant facilement pénétrables à l'air, subissent une décomposition bien plus active que ceux des vaches et des porcs qui ont des caractères opposés. Les déchets de viande (viande, viscères) des animaux domestiques, les chenilles, mollusques, larves se rapprochent sous ce rapport des excréments humains, tandis que les matières azotées analogues à la corne (cornes, sabots, poils, déchets de laine, chitine des insectes, déchets de cuir) font partie de ces substances qui s'altèrent avec le plus de difficulté, même en les comparant aux détritus végétaux.

Quant à ceux-ci, on constate d'une manière générale qu'*à l'état vert, ils tombent plus facilement en décomposition que s'ils ont été desséchés, puis humectés, et cette aptitude est proportionnelle à leur teneur en matières azotées*. Font exception ces matières humiques qui se sont formées par le processus de la putréfaction en l'absence de l'air ; exposées ensuite aux agents de décomposition, elles ne

s'altèrent qu'avec une extrême lenteur, malgré leur richesse en azote. C'est le cas de la tourbe qui, de toutes les matières organiques étudiées, oppose le plus de résistance.

Les causes de cette particularité ne sont pas encore bien connues et se rattachent probablement à certaines propriétés de la tourbe qui font obstacle à la pullulation des microorganismes ; elles tiennent peut-être aussi aux matières bitumineuses et coriacées qui se trouvent dans la tourbe, diminuent l'action des agents d'altération et entravent la décomposition de la masse. Le taux d'azote de la substance n'est pas toujours proportionnel à l'intensité du phénomène, puisque *la couverture des forêts,* comme le montre le tableau ci-dessus, *se décompose plus difficilement que les pailles plus pauvres pourtant en azote.* Pour expliquer le fait, il faut en rapprocher cette circonstance que le taux de résine et de principes tanniques dans les aiguilles et dans les feuilles est un obstacle à l'altération de ces organes. La décomposition lente de la couverture, telle qu'on l'observe dans la nature, tient aussi à la texture plus ou moins serrée de la masse qui diminue l'influence des divers facteurs, notamment celle de l'air.

Par le mélange de matières facilement et difficilement décomposables, on peut fabriquer un ensemble ayant une aptitude moyenne à cet égard ; c'est ce qui se fait en grand dans la préparation des fumiers. En mélangeant les litières avec les excréments, on augmente l'aptitude de celles-là à la décomposition en diminuant celle de ces derniers. C'est ce qui arrive encore quand on incorpore du fumier de cheval « chaud » à du fumier de vache « froid ».

Comme conclusion, il y aurait enfin à discuter les relations à ce point de vue entre les éléments azotés et non azotés des matières organiques. Abstraction faite des détails, il résulte de nombreuses observations que, dans une matière où existent ces deux sortes d'éléments, les non-azotés se décomposent relativement plus vite que les azotés, si bien qu'à mesure que progresse l'altération, le taux centésimal d'azote s'élève.

Ceci est vrai surtout des substances végétales. Le phénomène est influencé aussi qualitativement par les conditions extérieures de l'érémacausis.

Ces relations sont mises en évidence pour les produits végétaux par une recherche de J. NESSLER[1] qui dosa l'azote des feuilles de divers arbres forestiers à l'automne après leur chute et au printemps (mai), après qu'elles avaient passé tout l'hiver sur le sol en plein air. Le taux centésimal d'azote dans ces feuilles a été :

	FEUILLES de chêne.	FEUILLES de hêtre.
Non décomposées.	1,70	1,78
Décomposées	2,01	2,01

L'enrichissement en azote indiqué par ces chiffres et par d'autres recherches du même genre n'est pourtant que relatif. Il s'explique par ce fait que, dans les réactions, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène disparaissent en proportions relativement plus fortes que l'azote. Celui-ci cependant diminue par transformation en ammoniaque et acide nitrique, mais il reste finalement un résidu qui se montre plus ou moins réfractaire suivant les circonstances (comme il résulte des recherches de TUXEN relatées ci-dessus (voir p. 154). On y voit que 60-70 p. 100 des matières azotées de la poudre d'os, du guano de poisson et du fumier de cheval étaient transformées au bout de seize mois. Le reste représente-t-il les matières azotées plus difficilement attaquables de la substance primitive ou des composés azotés qui se transforment peu à peu en ammoniaque ? C'est là une question qui n'est pas encore résolue. Une partie de ces matières est sous forme d'amides, comme diverses observations l'ont établi[2], une autre a vraisemblablement passé dans le corps des animaux et des microorganismes. Cette dernière opinion, soutenue par P. KOSTYTCHEFF[3], est très probable ; car il n'est pas douteux que les principes absorbés par ces êtres pour leur nutrition soient empruntés au substratum en décomposition et dans une mesure proportion-

1. *Bericht über Arbeiten der grossh. Versuchsstation.* Karlsruhe, 1870, p. 90.

2. A. BAUMANN, *Ueber die Bestimmung des im Boden enthaltenen Ammoniakstickstoffs und über die Menge des assimilirbaren Stickstoffs im unbearbeiteten Boden.* Habilitationsschrift, 1886.

3. *Annales agronomiques,* t. XVII, 1891, p. 17-38.

nelle à leur pullulation; précisément ces produits de décomposition, tels que les composés ammoniacaux et amidés, servent très bien d'aliments aux bactéries et aux champignons. Il est donc possible que, parallèlement à la destruction des matières albuminoïdes, il s'en fasse par voie synthétique une reconstruction. La quantité d'albuminoïdes retenue par ce procédé est très variable et dépend essentiellement des conditions biologiques des animaux et des organismes inférieurs; mais, dans la plupart des cas, elle ne doit constituer qu'une part relativement faible de la matière primitive; du moins c'est ce qu'on doit conclure de ce fait, bien démontré, que la plus grande partie des principes azotés des matières organiques soumises à l'érémacausis se transforme en nourriture assimilable pour les plantes.

b) *Conditions extérieures de l'érémacausis.*

Des relations ci-dessus décrites entre les agents extérieurs de la vie et les fonctions des organismes inférieurs, on doit conclure *à priori* que les décompositions qu'ils provoquent sont influencées par une série de facteurs. Les recherches précédemment exposées montrent que l'accès de l'air, l'humidité, la chaleur et certains composés chimiques ont la plus grande influence sur l'intensité de l'érémacausis.

A) **Air.** — L'accès de l'air doit être mis naturellement à la première place dans un processus qui est caractérisé comme étant surtout un processus d'oxydation. J'ai cherché à montrer de la façon suivante comment l'accès de l'oxygène retentit sur le dégagement de l'acide carbonique[1].

Un mélange de 170 grammes de sable quartzeux et de 20 grammes de poussière de tourbe fut humecté avec 30 grammes d'eau et placé dans des tubes en U où arrivait soit de l'air avec des taux variés d'oxygène, soit de l'azote pur. Les quantités d'acide carbonique dégagées en vingt-quatre heures sont exprimées par les chiffres sui-

1. *Journ. für Landw.,* 1886, p. 232.

vants (moyennes de sept dosages pour l'essai I et de six pour l'essai II) :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

L'air injecté renfermait :

Essai I.

	100 O.	67 O. 33 Az.	33 O. 67 Az.	100 Az.
Acide carbonique . . .	12,368	11,452	10,945	8,356

Essai II.

	21 O. 79 Az.	15 O. 85 Az.	8 O. 92 Az.	2 O. 98 Az.	100 Az.
Acide carbonique. . .	12,509	10,883	10,078	3,619	3,336

On voit que l'oxydation du carbone augmente avec le taux d'oxygène sans lui être proportionnelle ; car au-dessus d'une certaine limite (8 p. 100 d'oxygène), l'augmentation d'acide carbonique est insignifiante, tandis qu'au-dessous sa production est fort diminuée. Elle ne cesse pourtant pas, même si l'oxygène est entièrement remplacé par un gaz inerte, tel que l'azote. Ce fait a été mis en évidence encore par d'autres essais dus, les uns à moi, les autres à J. von Fodor[1]. Il est difficile de décider si l'acide carbonique qu'on rencontre dans ce dernier cas s'est formé aux dépens de substances réductibles (nitrates, sels de fer et de manganèse au maximum) ou si c'est du gaz produit avant le début de l'expérience et qui se dégage peu à peu. Il est probable que c'est à ces deux causes qu'est due la présence de l'acide carbonique dans un milieu sans oxygène.

Les recherches de Th. Schlœsing[2] ont donné les mêmes résultats ; le dégagement d'acide carbonique s'est accru avec le taux d'oxygène, mais, au delà d'une certaine limite, il s'est montré plus ou moins indépendant de la quantité d'oxygène et n'a pas cessé, même quand le sol n'a été pourvu que d'un gaz (azote) sans action sur la décomposition des matières organiques. Ainsi dans des mé-

1. *Hygienische Untersuchungen über Luft, Boden und Wasser.* Braunschweig, 1882.

2. *C. R.*, t. LXXVII, 1873, p. 203 et 353.

langes d'azote et de 0, 6, 11, 18, 21 p. 100 d'oxygène, SCHLŒSING a trouvé 9mg,3, 15mg,9, 16 milligr., 16mg,6 et 16 milligr. d'acide carbonique produit par jour dans 1 kilogr. de terre.

On voit qu'ici encore, à partir de 6 p. 100 d'oxygène, la production d'acide carbonique est restée à peu près constante, quelle qu'ait été la quantité d'oxygène introduite dans le milieu. Les différences ont même été bien moindres que dans mes essais, ce qui tient au dispositif des expériences. Tandis que dans les miennes, le mélange d'air n'était renouvelé qu'après chaque prise, toutes les vingt-quatre heures, dans celles de SCHLŒSING ce renouvellement était beaucoup plus fréquent pour que l'air offert au sol eût toujours la même composition. Ses résultats sont moins démonstratifs, parce qu'en employant des mélanges plus pauvres en oxygène que les miens, il fournissait néanmoins par cet incessant renouvellement des quantités d'oxygène suffisantes pour la décomposition complète des matières organiques.

Les travaux de Th. SCHLŒSING[1] sur l'influence de l'air dans la nitrification ont montré qu'elle dépend de la quantité d'oxygène en présence, mais peut se produire encore nettement avec un accès d'air limité. Cet auteur a fait passer à travers cinq échantillons d'un sol riche en humus (2 kilogr.) des mélanges d'oxygène et d'azote en diverses proportions. Les quantités de nitrate formées du 5 juillet au 7 novembre 1872 ont été :

Proportion d'oxygène dans l'air.	p. 100	1.5	6	11	16	21
Acide nitrique.	milligr.	45,7	95,7	132,5	246,6[2]	162,6[2]

La quantité d'acide nitrique croît donc avec le taux d'oxygène, mais elle est encore assez forte même avec une faible proportion de ce gaz, circonstance qui s'explique peut-être par le dispositif de l'expérience. Pour maintenir constante la composition de l'air occlus dans le sol, on y fit passer le mélange d'air sans interruption, ce qui fait que, même avec un faible taux d'oxygène dans le mélange, il y avait d'assez grandes quantités de ce gaz disponibles pour l'oxydation.

1. *Loc. cit.*
2. SCHLŒSING pense qu'il y a eu probablement interversion dans ces deux résultats.

Les résultats suivants d'une expérience de v. FODOR[1] montrent que la nitrification s'arrête en l'absence d'air. Il remplit un large tube de zinc avec 3 kilogr. de sol humide et le ferma par un bouchon de caoutchouc. Après l'avoir laissé pendant trois semaines à la température de la chambre, il l'arrosa de 100 centimètres cubes d'eau, puis, pendant seize jours, il aspira de l'air à travers ce sol et l'arrosa encore une fois avec 100 centimètres cubes d'eau. Il reboucha le tube et, au bout de vingt-trois jours, l'arrosa d'eau distillée. L'eau employée à l'arrosage fut analysée après son passage à travers le sol. 100 centimètres cubes renfermaient en milligrammes :

		ACIDE nitrique.	ACIDE nitreux.	AMMONIAQUE.
Sans air	*a*. . .	0,0	0,12	18,0
	b. . .	0,0	0,12	16,0
Avec air	*a*. . .	4,1	0,13	10,0
	b. . .	3,8	0,13	8,0
A nouveau sans air	*a*. . .	0,065	0,00	(non dosé
	b. . .	0,090	0,00	par accident)

En présence de l'air, la décomposition a donc lieu avec formation d'acide nitrique et nitreux ; mais en l'absence d'air, au lieu d'acide nitrique, il se produit de l'ammoniaque ; il n'y a pas trace d'acide nitrique ; bien plus, quand l'air fait défaut, l'acide nitreux déjà formé et même la plus grande partie de l'acide nitrique sont de nouveau réduits. Les observations de BOUSSINGAULT[2] et de MILLON[3], montrant qu'un sol saturé d'eau, peu perméable à l'air, ne nitrifie pas, concordent avec celles de FODOR.

En résumant les résultats précédents, on peut dire que :

1° *L'intensité de l'érémacausis (oxydation du carbone et de l'azote) augmente en général avec le taux d'oxygène fourni, mais pas proportionnellement ; d'abord progressive, l'augmentation devient insignifiante à partir d'une certaine limite ;*

2° *L'acide carbonique peut se produire même en l'absence d'oxygène, mais dans une faible mesure ;*

1. *Loc. cit.*
2. *C. R.*, t. LXXXVI, p. 22.
3. *C. R.*, t. LIX, p. 282.

3° *En l'absence d'air, non seulement la nitrification ne se fait pas, mais les nitrates et les nitrites du sol se réduisent.*

Il était logique, dans le même ordre d'idées, de rechercher si l'influence de l'oxygène actif (ozone) sur l'érémacausis était la même que celle de l'oxygène ordinaire. Pour résoudre la question, je fis passer[1], à travers du sable calcaire riche en humus (300 grammes) additionné de 80 grammes d'eau, soit de l'air, soit de l'oxygène pur, soit de l'air ozonisé. Celui-ci était préparé en faisant passer de l'air à travers un flacon rempli d'essence de térébenthine (*a*) ou à travers un vase dont le fond était garni d'une solution de permanganate de potasse additionnée d'acide sulfurique (*b*). La moyenne de sept dosages donna, pour le dégagement d'acide carbonique, les chiffres suivants :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

	OXYGÈNE.	AIR OZONISÉ. *a.*	AIR OZONISÉ. *b.*	AIR atmosphérique.
Acide carbonique. . .	86,849	73,216	68,497	79,212

Dans un second essai, l'air fut ozonisé en le faisant passer par aspiration dans un flacon sur le fond duquel se trouvaient des bâtons de phosphore à demi recouverts d'eau. Entre ce flacon et le tube en U contenant le sol en expérience on intercala un vase plein d'eau pour purifier l'air du nitrate d'ammoniaque naissant en présence de l'ozone.

Dans un cas (A), on employa de nouveau le sable calcaire riche en humus (140 grammes avec 35 grammes d'eau), dans l'autre (B), un mélange de sable quartzeux (170 grammes), de tourbe pulvérisée (20 grammes) et de 30 grammes d'eau. Voici les résultats (moyennes de huit dosages) :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

	A. AIR ozonisé.	A. AIR ordinaire.	B. AIR ozonisé.	B. AIR ordinaire.
Acide carbonique. . .	22,228	27,976	13,687	12,947

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 236.

Le sol avec tourbe donnant un résultat différent de ceux obtenus auparavant, on dut recommencer l'essai. Le dispositif fut le même, avec cette seule différence qu'au lieu de sable calcaire riche en humus on employa un mélange (A) de 170 grammes de sable quartzeux, 2 grammes de fumier de cheval pulvérisé et 20 grammes d'eau. L'analyse de l'air extrait du sol accusa les différences suivantes (moyennes de six dosages) :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

	A.		B.	
	AIR ozonisé.	AIR ordinaire.	AIR ozonisé.	AIR ordinaire.
Acide carbonique. . .	23,174	30,715	14,949	9,106

L'ozone ralentit donc en général l'érémacausis des matières organiques. C'est seulement pour la tourbe que le contraire se produit.

Il est difficile jusqu'à présent de donner une explication plausible de ces résultats. Il est certain que l'ozone, puissant agent d'oxydation, a diminué la production d'acide carbonique dans des matières organiques facilement décomposables. Ceci ne peut s'expliquer qu'en admettant que l'ozone a entravé l'activité vitale des organismes qui interviennent dans la décomposition. (Voir *Note C.*) Pour la tourbe, il se peut que les combinaisons carbonées qui s'y trouvent mélangées à l'humus en quantités assez considérables soient directement attaquées par l'ozone et que ce soit la cause de l'augmentation observée dans la production de l'acide carbonique.

B) **Chaleur.** — Puisque la destruction des matières organiques est liée à l'activité de certains êtres, on ne doit pas s'étonner que la chaleur joue un grand rôle dans le phénomène. J. Möller [1] et J. von Fodor [2] ont trouvé que le dégagement d'acide carbonique augmente en général avec la température et ne cesse pas à 60°, quoique, au delà de cette limite, il diminue.

Dans mes recherches sur cette question, j'employai le même dis-

1. *Mittheilungen aus dem forstlichen Versuchswesen Œsterreichs.* Vienne, 1878, vol. I, fasc. 2.

2. *Hygienische Untersuchungen über Luft, Boden und Wasser,* 2e partie.

positif que dans mes précédents essais, avec cette seule différence que les tubes en U contenant les matières en expérience étaient plongés, non plus dans une cuve commune, mais chacun dans un vase spécial rempli d'eau. Dans ces vases où l'eau devait avoir une température constante de 10° se trouvait un serpentin en plomb où circulait de l'eau à 5-6°. La source de chaleur était un bec de gaz placé sous chaque vase et muni d'un régulateur (thermostat de Soxhlet). Pour le reste, il fut procédé exactement comme pour les recherches exposées précédemment. La quantité d'eau aspirée était chaque fois d'un litre. Voici les résultats exprimant la moyenne de 2-3 dosages :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

	TAUX d'eau. — p. 100.	TEMPÉRATURE DU SOL. 10°. —	20°. —	30°. —	40°. —	50°. —
I. Terre de compost : 372 gr.	44.00	**2,80**	**15,46**	**36,24**	**42,61**	**76,32**
II. Sable calcaire pur avec tourbe pulvérisée : 458gr,0	13.09	**5,42**	**11,56**	**20,73**	**32,04**	**42,42**
III. Terre de compost : 284gr,0	6.79	**2,03**	**3,22**	**6,86**	**14,69**	**25,17**
IV. — 340gr,8	26.79	**18,38**	**54,24**	**63,50**	**80,06**	**81,52**
V. — 397gr,6	46.79	**35,07**	**61,49**	**82,21**	**91,86**	**97,48**

D'après ces chiffres, la production d'acide carbonique dans les sols augmente avec la température, d'abord très vite, puis de plus en plus lentement. Concluons donc que *la décomposition des matières organiques, toutes conditions extérieures égales, s'accélère à mesure que la température s'élève.*

Les limites de température au-dessus desquelles l'oxydation du carbone s'arrête et dans l'intérieur desquelles se fait l'érémacausis avec une intensité croissante et décroissante, n'ont pas encore été déterminées exactement. Il ne semble pas qu'il y ait un dégagement d'acide carbonique au-dessous de 0° ; les quantités de ce gaz récoltées dans ces conditions provenaient de réactions survenues antérieurement à la gelée, à des températures plus élevées.

J. MÖLLER[1] en a donné la preuve expérimentale. *Au-dessus du*

1. Il plaça 600 grammes de terre fumée dans un mélange réfrigérant de glace et de sel et dosa l'acide carbonique contenu dans un litre de l'air du sol = 50^{mc},4. Le lendemain le mélange réfrigérant était fondu et fut renouvelé. La terre resta alors dix heures gelée. Des prises d'air faites pendant ce temps, la première accusa dans

point de congélation de l'eau, l'oxydation du carbone augmente constamment avec la température jusqu'à un certain degré (optimum) au delà duquel elle décroît pour des températures de plus en plus élevées et finalement s'arrête (maximum). L'optimum et le maximum de chaleur relatifs à la production de l'acide carbonique ne sont pas encore suffisamment déterminés. D'après mes recherches et celles de J. Möller, l'optimum serait vers 50-60° ; mais les résultats ne sont pas à l'abri des objections, parce que les observations n'ont pas été continuées assez longtemps et qu'une plus ou moins forte portion de l'acide dosé peut provenir du gaz qui s'était dégagé avant l'installation des expériences.

Les résultats obtenus par P. Kostytscheff [1] semblent plus dignes de confiance, parce qu'il a déterminé en dixièmes de milligramme les quantités d'acide carbonique que 100 grammes de feuilles fraîches de bouleau desséchées et pulvérisées dégageaient à divers degrés de température et d'humidité. Voici ses chiffres :

TEMPÉRATURE.	HUMIDITÉ POUR 100.				
	78.9	64.1	38.7	11.7	3.6
—	—	—	—	—	—
0-5°.	1 950	2 088	2 254	43	0
17°.	3 785	3 445	5 184	23	0
35°.	14 913	15 441	15 022	122	0
50°.	5 188	5 494	5 544	379	59
65°.	3 821	3 957	4 132	657	102

L'optimum de température pour le dégagement de l'acide carbonique est donc environ 35°, le maximum dépasse 65° et gît, suivant toute vraisemblance, vers 80°.

Quant à l'oxydation de l'azote (nitrification), les recherches de Th. Schlœsing ont appris qu'elle se fait avec une lenteur extrême à 5°, qu'elle est nettement sensible à 12°, qu'elle atteint son optimum à 37° et qu'à 55° elle cesse complètement.

un litre 44^{mg},4, la seconde 9^{mg},6, la troisième 5^{mg},4 et la dernière seulement 0^{mg},4 d'acide carbonique. Un second essai où Möller avait placé la même terre dans un mélange réfrigérant donna, pour le premier litre, 15^{mg},2, pour les deux suivants, aspirés à deux heures d'intervalle, 0^{mg},8 et 0^{mg},4, donc à peine plus qu'il n'en existe dans l'atmosphère.

1. *Annales de la Science agronomique française et étrangère*, 1887, t. II, p. 165.

C) **Humidité.** — J. MÖLLER[1] a cherché à déterminer par divers essais le rôle joué par l'eau dans la décomposition de la matière organique.

Dans une terre fumée qui avait été desséchée à 100°, il n'y eut aucun dégagement d'acide carbonique. Mais les analyses ci-après montrent que, par la seule influence des rayons solaires, la terre peut devenir assez sèche pour que ce gaz ne s'y forme plus. Des feuilles de charme et des aiguilles de pin noir furent desséchées au soleil, et 5 grammes furent mélangés à 300 grammes de sable quartzeux desséché de la même façon.

On mit aussi en expérience 300 grammes de terre de compost séchée au soleil. Les trois sols furent placés dans des appareils tels que l'air atmosphérique ne pouvait y arriver; celui qui était introduit après les prises d'essai était dépouillé de son acide carbonique. Le tableau suivant donne les résultats exprimés en volume d'acide carbonique pour 1 000 volumes d'air.

	FEUILLES.	AIGUILLES.	TERRE de compost.
	—	—	—
13 juillet.	0.87	2.60	»
14 —	0.55	0.99	4.38
16 —	»	»	2.32
20 —	0.43	0.00	0.87
21 —	0.00	»	0.00
27 —	0.00	0.00	0.00

Le dernier jour, MÖLLER introduisit dans chaque vase 50 centimètres cubes d'eau distillée, préalablement bouillie. Les dosages d'acide carbonique donnèrent alors les résultats suivants :

	FEUILLES.	AIGUILLES.	TERRE de compost.
	—	—	—
27 juillet.	5.45	1.30	4.58
28 —	1.30	0.87	9.98
29 —	28.17	7.58	26.44
30 —	36.84	10.83	20.04
31 —	49.29	13.00	21.66

Il résulte de ces chiffres que le dessèchement du sol est lié à son appauvrissement en acide carbonique, tandis que l'humidité augmente le dégagement de ce gaz dans une proportion considérable.

1. *Mittheilungen, etc.*, vol. I, fasc. 2, 1878, p. 136-140.

J. VON FODOR[1] a employé, pour ses recherches sur ce sujet, des poids égaux de sable auxquels furent intimement mélangés 5 grammes de sucre et 1 gramme d'urée ; il les arrosa de quantités variables d'eau, et obtint en vingt-quatre heures les volumes suivants d'acide carbonique :

	TENEUR DU SOL EN EAU.			
	2 p. 100.	4 p. 100.	8 p. 100.	17 p. 100.
30 mai 1877	2.0	24.0	41.0	66.0
31 —	3.0	18.6	44.7	74.1
9 juin 1877	5.0	121.4	138.0	211.4

Il est évident que l'humidité hâte la décomposition des matières organiques ; mais quand l'humidité croît en progression géométrique, l'acide carbonique croît seulement en progression arithmétique. Il y a une énorme différence dans l'intensité du phénomène quand le taux d'eau passe de 2 p. 100 à 4 p. 100. Avec 2 p. 100 d'eau, il se développe à peine une trace d'acide carbonique et après un temps assez long ; avec 4 p. 100 le dégagement est déjà considérable ; il est 10-20 fois plus grand qu'avec 2 p. 100. Il semble suffire que l'humidité d'un sol atteigne 4 p. 100 pour que la décomposition s'y fasse presque avec pleine intensité ; d'autre part, le sol n'a qu'à perdre 1-2 p. 100 pour qu'elle s'arrête.

Dans mes essais[2], les sols desséchés à l'air furent mélangés avec soin et partagés en plusieurs portions de poids égal dont chacune, mise dans une capsule de porcelaine, fut malaxée avec la quantité voulue d'eau distillée de façon à avoir une masse aussi homogène que possible et fut ensuite placée dans les tubes en U.

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

TAUX d'eau.	TEMPÉRATURE DU SOL (terre de compost).				
	10°.	20°.	30°.	40°.	50°.
p. 100.					
6.79	2,03	3,22	6,86	14,69	25,17
26.79	18,38	54,24	63,50	80,06	81,52
46.79	35,07	61,49	82,12	91,86	97,48

1. *Loc. cit.*, p. 44.
2. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 243.

Tous ces résultats sont concordants[1] et montrent que *les matières organiques se décomposent d'autant plus vite qu'elles sont plus humides.*

Ceci n'est vrai pourtant qu'à condition que l'eau n'obstrue pas les pores au point d'entraver notablement l'accès de l'air. *Au delà d'une certaine proportion l'eau doit abaisser la production d'acide carbonique,* parce qu'elle diminue l'afflux d'air (voir p. 170). Le dégagement d'acide ne cesse cependant pas dans un sol saturé d'eau ; fait analogue à celui qui a été observé quand, au lieu de plonger le sol dans l'air, on le met dans un gaz inerte ; mais dans les deux cas il diminue énormément.

J'ai prouvé qu'il en était ainsi par une expérience. De la tourbe de Kolbermoor (Haute-Bavière) fut bouillie pendant trois jours pour chasser tout l'acide carbonique et placée dans un large tube de verre rempli d'eau. A chaque dosage d'acide carbonique, on chassa de bas en haut 2 litres d'azote à travers le sol plongé sous l'eau et on fit passer le gaz dans les tubes à baryte. A la température de 30°, le volume d'acide carbonique dégagé (moyenne de sept dosages) fut de 1,683 pour 1 000 volumes d'air. Dans un second essai on procéda de même. Mais, pour pouvoir estimer en même temps la diminution provoquée par l'absence de l'air dans la formation d'acide carbonique, on fit passer pendant quelque temps à travers le sol, au lieu d'azote, de l'air atmosphérique sous pression, trois semaines après la dernière prise de gaz et on y dosa l'acide carbonique.

La moyenne de treize dosages donne pour l'acide carbonique dégagé :

En l'absence de l'air . . .	1,964	volumes pour	1 000 volumes.
En présence de l'air . . .	5,165	—	—

On peut déduire de ces chiffres que l'oxydation du carbone dans un sol complètement imbibé n'est pas arrêtée, mais elle est notablement diminuée. Ces faits, rapprochés des résultats des expériences faites pour mesurer l'influence de l'air, c'est-à-dire de l'oxygène, sur la décomposition, semblent justifier cette conclusion que *l'acide*

1. Comparez aussi les résultats des expériences de KOSTYTSCHEFF signalées plus haut.

carbonique se dégage avec le plus d'activité, quand la substance possède un taux moyen d'humidité (optimum) à partir duquel, soit qu'il augmente, soit qu'il diminue, le dégagement se ralentit constamment jusqu'à devenir nul quand la substance est à l'état de complète dessiccation à l'air, et très faible quand elle est saturée d'eau[1].

Cette loi s'applique à la nitrification. Son intensité s'accroît avec le taux d'eau de la substance, entre certaines limites, comme il résulte de l'expérience suivante de P. P. DEHÉRAIN[2]. Il mit sous une cloche de verre, où se trouvait un vase rempli d'eau, de petits vases contenant 100 grammes de terre et arrosés de 5, 10, 15, 20 et 25 centimètres cubes d'eau. La terre contenait au début $0^{gr},160$ d'azote organique et $0^{gr},015$ d'acide nitrique dans les 100 grammes. Les quantités de nitrate formées en quatre-vingt-dix jours ont été les suivantes :

Quantité d'eau dans le sol	cent. cub.	5	10	15	20	25
Acide nitrique dans 100 gr. de terre.	milligr.	25	26	27	29	37

Dans un second essai on ajouta aux 100 grammes de terre, $0^{gr},010$ de sulfate d'ammoniaque. Pour le même laps de temps que dans l'expérience précédente, les quantités d'acide nitrique formées ont été :

Quantité d'eau dans le sol	cent. cub.	5	10	15	20	25
Acide nitrique dans 100 gr. de terre.	milligr.	19	49	57	60	53

Si l'on considère en outre qu'une terre prise en pleine nitrification perd par la dessiccation tout son pouvoir nitrifiant et que dans le sol gorgé d'eau il ne se forme pas trace d'acide nitrique, qu'au contraire celui qui existe se réduit[3], on voit que les lois trouvées pour l'oxydation du carbone s'appliquent pleinement à celle de l'azote, en ce qui concerne l'action de l'humidité.

1. Les travaux de KOSTYTSCHEFF, analysés dans les *Annales de la Science agronomique française et étrangère,* 1887, t. II, p. 165, sont aussi très instructifs à cet égard.

2. *Annales agronomiques,* t. XIII, 1887, p. 241-261.

3. J. VON FODOR, *loc. cit.*

D) **Lumière**. — L'influence de la lumière sur les processus chimiques de l'érémacausis n'a été jusqu'alors établie que pour la nitrification. D'après J. Soyka[1], la lumière l'entrave, tandis que l'obscurité a une action favorable. De deux échantillons de sable humecté d'urine étendue, l'un fut exposé à la lumière, l'autre à l'obscurité. Pour 100 centimètres cubes d'urine, l'azote trouvé sous forme de nitrate et de nitrite s'éleva :

	ESSAI I. — milligr.	ESSAI II. — milligr.
À la lumière à.	19	110
À l'obscurité à.	86	360

R. Warington[2] a obtenu des résultats analogues.

E) **Électricité**. — On a affirmé de divers côtés qu'une solution de certains éléments du sol pouvait être influencée par un courant galvanique[3]. Comme il pouvait se faire qu'il y eût aussi influence sur la décomposition des matières organiques, je fus amené[4] à soumettre cette question à une épreuve expérimentale. Les sols imprégnés d'égales quantités d'une même solution furent placés dans des tubes en U, suivant le dispositif maintes fois employé, et dans les deux branches en contact intime avec le sol et à sa surface furent disposées des plaques métalliques reliées par des fils de cuivre aux pôles d'une batterie électrique ou d'une bobine d'induction. Voici les quantités d'acide carbonique dégagées à la température de 30° à intervalles égaux de vingt-quatre heures (moyenne de huit dosages).

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

	COURANT d'induction (2 éléments). —	2 ÉLÉMENTS Meidinger. —	1 ÉLÉMENT Meidinger. —	SANS électricité. —
I. Mélange de 450 gr. sable quartzeux, 2 gr. fumier de cheval en poudre et 60 gr. eau distillée	12,12	12,37	12,74	13,33

1. *Zeitschrift für Biologie,* vol. XIV, 1878.
2. *Landw. Versuchsstationen,* vol. XXIV, 1879, p. 161-166.
3. *Agronomische Zeitung,* 1861, p. 550.
4. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik,* vol. XI, 1888, p. 105-111.

	COURANT d'induction (3 éléments).	3 ÉLÉMENTS Meidinger.	1 ÉLÉMENT Meidinger.	SANS électricité.
II. Mélange de 450 gr. sable quartzeux, 2 gr. paille de seigle pulvérisée et 60 gr. d'eau distillée. . . .	7,79	7,23	7,60	7,57
III. Mélange de 450 gr. sable quartzeux, 2 gr. poussière de tourbe d'Oldenburg et 60 gr. d'eau distillée.	2,31	2,17	2,24	2,25
IV. 250 gr. de sol (sable calcaire riche en humus) et 80 gr. d'eau distillée	15,60	14,36	15,89	15,54

	COURANT d'induction (5 éléments).	5 ÉLÉMENTS Meidinger.	SANS électricité.
V. Mélange de 450 gr. sable quartzeux, 2 gr. fumier de cheval en poudre et 60 gr. d'eau distillée	11,89	12,96	11,41
VI. 250 gr. de sol (sable calcaire riche en humus) et 50 gr. d'eau distillée	11,32	11,88	12,45
VII. Mélange de 450 gr. sable quartzeux, 2 gr. paille de seigle pulvérisée et 60 gr. d'eau distillée.	5,89	6,98	6,69

Ces chiffres montrent avec une parfaite concordance que *la décomposition des matières organiques n'est influencée ni par des courants d'induction, ni par des courants galvaniques d'intensités diverses.*

Pour déterminer l'influence d'un courant galvanique sur la nitrification, $2^{kg},5$ de terre de jardin humide bien mélangée furent mis à l'état humide dans deux cylindres en verre qu'on couvrit d'une feuille de carton et qu'on exposa pendant trois mois à la chaleur tempérée d'une chambre. Pendant tout ce temps, on fit passer à travers la terre d'un des cylindres le courant électrique fourni par un élément Meidinger. Les deux échantillons furent à la fin épuisés à l'aide de 2 litres d'eau distillée. Dans la liqueur filtrée, on trouva les quantités suivantes d'ammoniaque et d'acide nitrique rapportées à 1 000 parties de sol sec :

	AMMONIAQUE.	ACIDE nitrique.
Sol électrisé	0,006	0,088
Sol non électrisé	0,010	0,077

Ces nombres accusent une faible augmentation dans la nitrification, grâce à un courant galvanique peu intense ; mais ce résultat n'est pas très probant à cause de l'extrême pauvreté de la terre en combinaisons azotées solubles.

F) **Agents chimiques.** — La présence des acides, des bases, des sels a une influence considérable sur les processus de l'érémacausis, et c'est là un fait des plus importants pour la pratique, puisqu'il donne la possibilité de modifier les réactions dans un sens déterminé.

D'après ce qu'ont appris les recherches faites jusqu'ici, les acides ralentissent l'érémacausis. Je l'ai prouvé[1] en dosant l'acide carbonique qui se dégageait en présence de l'air et en vingt-quatre heures d'un mélange de sable quartzeux (400 grammes) et de fumier de cheval en poudre (2 grammes) additionné de 40 centimètres cubes d'une solution d'acides minéraux à 0.1 p. 100 ou 0.2 p. 100 ou simplement arrosé de 40 centimètres cubes d'eau distillée. Les résultats ci-après expriment la moyenne de huit dosages :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

		ACIDE				
Matière ajoutée . .	EAU.	chlorhydrique.		sulfurique.	nitrique.	phosphorique.
	—	—		—	—	—
		p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Taux de la solution.	»	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
En pour-cent du sol.	»	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Acide carbonique. .	**18,410**	**15,086**	**10,477**	**12,503**	**10,294**	**17,380**

Ces chiffres montrent que *l'oxydation du carbone dans l'érémacausis, en présence des acides minéraux, même dilués, se ralentit d'autant plus qu'ils sont plus concentrés*. La nitrification, elle aussi, est non seulement amoindrie, mais arrêtée dès que le substratum est faiblement acide. Ceci s'applique même aux acides nitrique et nitreux dès qu'ils se sont accumulés à assez haute dose dans une matière en nitrification sans pouvoir se combiner.

Quant à l'influence sur la décomposition des matières organiques

1. *Journ. für Landw.*, 1886, p. 255.

de l'alcalinité de la solution qui les imprègne, j'ai pris des mélanges de 400 grammes de sable quartzeux et de 4 grammes de paille de seigle pulvérisée ; les uns furent imbibés d'eau, les autres de solutions alcalines (40 centimètres cubes) de concentration variée ; tous furent exposés à la décomposition, de la même façon que précédemment et à une température de 30°. Voici les résultats (moyennes de 7-9 dosages) :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

Matière ajoutée	EAU.	SOLUTION DE POTASSE.				
	—	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Taux de la solution . .	»	0,1	0,5	1	2	5
(En pour-cent du sol) .	»	(0,01)	(0,05)	(0,10)	(0,20)	(0,50)
Acide carbonique . . .	**8,099**	**10,493**	**9,260**	**8,059**	**4,994**	**0,609**

Dans l'essai suivant, le sol artificiel était formé de 300 grammes de sable quartzeux, 5 grammes de tourbe pulvérisée et 60 centimètres cubes de solution ou d'eau. Les quantités d'acide carbonique dégagées furent les suivantes :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

Matière ajoutée	EAU.	SOLUTION DE POTASSE.		
	—			
(En pour-cent du sol) .	»	(0,016)	(0,033)	(0,067)
Acide carbonique . . .	**3,605**	**4,083**	**4,518**	**5,005**

De ces deux expériences, on doit conclure que *l'érémacausis est favorisée par la présence de solutions alcalines faibles, mais que des solutions trop concentrées la diminuent, et proportionnellement à leur concentration.*

La cause de ce dernier fait ne tient pas, comme on pourrait le croire, à une combinaison de l'acide carbonique avec la potasse, car la quantité d'acide libre suffit parfaitement à carbonater l'alcali dans un très bref délai, même s'il s'agit de fortes doses d'alcali. On ne peut du reste accepter cette opinion, puisque les carbonates alcalins exercent la même influence que les alcalis hydratés. Pour préciser cette action, m'écartant des concentrations employées dans mes précédentes recherches, je n'ai employé que des liqueurs très diluées. Dans l'essai I, les tubes reçurent un mélange de 400 gram-

mes de sable quartzeux, 4 grammes de paille de seigle pulvérisée et 40 centimètres cubes de solution ; dans l'essai II, ils reçurent 300 grammes de sable quartzeux, 5 grammes de tourbe pulvérisée (d'Oldenbourg) et 60 centimètres cubes de solution. Les analyses de l'air aspiré ont donné les résultats suivants (moyenne de sept dosages):

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

Essai I.

Matière ajoutée . . .	EAU.	CARBONATE de potasse.		CARBONATE de soude.		
	—	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Concentration de la solution.	»	0,01	0,05	0,05	0,1	0,5
En pour-cent du sol .	»	0,001	0,005	0,005	0,01	0,05
Acide carbonique . .	**11,289**	**12,321**	**12,541**	**12,014**	**12,093**	**13,187**

Essai II.

Matière ajoutée.	EAU.	CARBONATE de potasse.	
	—	p. 100.	p. 100.
Concentration de la solution. . .	»	0,167	0,334
En pour-cent du sol	»	0,033	0,067
Acide carbonique	**3,605**	**4,638**	**5,801**

Ces chiffres prouvent que *des solutions étendues de carbonates alcalins favorisent la décomposition des matières organiques, surtout quand elles sont déjà en train de s'altérer* (*tourbe*).

L'action des hydrates et carbonates des terres alcalines est diversement appréciée. Les uns leur accordent une influence favorable à la décomposition ; les autres citent des observations d'après lesquelles ces substances entraveraient le phénomène ; tels sont les résultats des essais installés par E. WOLFF [1] et J. NESSLER [2].

Le premier soumit du fumier frais, préalablement analysé, à des conditions de décomposition différentes. Une portion fut abandonnée à l'air libre, deux autres furent mises à couvert, l'une telle quelle, la seconde avec de la chaux caustique (250 grammes par pied cube

1. *Landw. Versuchsstationen,* 1859, p. 141.

2. *Bericht über Arbeiten der Grossh. Versuchsstationen.* Karlsruhe, 1870, p. 93-103.

de fumier). Au bout de quinze mois, il y avait encore les quantités suivantes, exprimées en pour-cent de la teneur primitive :

	A L'AIR libre.	A COUVERT tel quel.	avec chaux.
	P. 100.	P. 100.	P. 100.
Fumier frais	46.9	48.8	41.1
Matière organique	25.2	33.8	44.0
Azote	44.1	67.6	92.5

L'addition de chaux a, d'après ces chiffres, diminué la perte en matière organique et en azote et, par suite, exercé une action retardatrice sur la décomposition.

Dans les essais de NESSLER, une addition de chaux caustique à diverses matières organiques telles que de la tourbe, de la poudre d'os brute et soumise à la vapeur a, dans les trois premiers mois, retardé la décomposition à des degrés divers ; dans les neuf mois suivants, il y eut compensation ou bien augmentation d'activité, si bien qu'au bout d'un an le retard apporté par la chaux à la destruction des matières organiques ne se montrait pas encore toujours nettement.

PETERSEN[1] est arrivé à un autre résultat : il a trouvé que les sels de chaux hâtaient la décomposition des matières contenant de l'humus acide. L'expérience fut faite avec une terre de forêt feuillue de réaction très acide, dont le taux d'humus s'élevait à 58 p. 100 et à laquelle on ajouta, dans un cas 1 p. 100, dans l'autre 3 p. 100 de carbonate de chaux.

En seize jours, des poids égaux de ce sol ($20^{gr},6$ à l'état sec) dégagèrent :

	I. SOL tel quel.	I. SOL avec 1 p. 100 de Ca O, CO^2.	II. SOL tel quel.	II. SOL avec 3 p. 100 de Ca O, CO^2.
	milligr.	milligr.	milligr.	milligr.
Acide carbonique.	47,20	181,12	44,67	244,71

Bien qu'une partie de l'acide carbonique du sol chaulé puisse provenir de la portion du calcaire dont la chaux se combine avec les

1. *Landwirthschaftliche Versuchsstationen,* vol. XIII, 1870, p. 155-175.

acides humiques, on constate que, même dans le cas le plus favorable, cette partie est moindre que la quantité observée dans le sol chaulé. En conséquence, la décomposition des matières humiques acides est activée par leur mélange avec du carbonate de chaux.

Pour voir clair dans ces divergences d'appréciation, j'ai installé[1] une série d'expériences. Dans les tubes en U on disposa, d'une part, un mélange de sable quartzeux (400 grammes) et de paille de seigle finement pulvérisée (4 grammes), additionné de 40 centimètres cubes d'eau distillée (essai I), et, d'autre part, un mélange de sable quartzeux (300 grammes) et de tourbe pulvérisée (5 grammes), additionné de 60 centimètres cubes d'eau (essai II).

Ces sols reçurent diverses quantités de chaux caustique qui fut mise en suspension dans l'eau d'arrosage ; l'un resta tel quel. Le tableau ci-dessous contient les résultats obtenus (moyenne de huit essais) :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

Essai I.

	SOL					
	tel quel.	additionné de chaux caustique.				
		0gr,04.	0gr,2.	0gr,4.	0gr,8.	2gr,0.
Acide carbonique. .	12,981	10,949	9,819	6,837	0,456	0,350

Essai II.

	SOL			
	tel quel.	additionné de chaux caustique.		
		0gr,05.	0gr,1.	0gr,2.
Acide carbonique.	3,194	3,374	3,614	3,902

La chaux caustique a donc diminué la production d'acide carbonique dans les matières organiques non décomposées (paille de seigle) ; elle l'a au contraire augmentée dans les substances déjà altérées (tourbe).

Les résultats relatifs à la paille tiennent surtout à une action spécifique de la chaux, et pas seulement à une combinaison de l'acide

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 261.

carbonique avec cette chaux ; car les quantités d'acide perdues par cette voie ne sont pas assez grandes pour expliquer la diminution de production de l'acide carbonique dans l'essai en question. Le sol tel quel a dégagé, pendant la durée de l'essai, au moins $596^{mg},8$ d'acide carbonique, étant donné qu'à chaque dosage on a extrait 2 litres et, entre les dosages, 1 litre. Pour saturer 0,04, 0,2, 0,4, 0,8 et 2 grammes de chaux, il faut respectivement 18, 90, 180, 360 et 540 milligrammes, ou (en rapportant à 596,8) 3,0, 15,1, 30,2, 60,4 et 90,6. La diminution dans l'acide carbonique est, p. 100, de 15.7, 23.6, 47.3, 96.3 et 97.3. Il résulte immédiatement de là que les chiffres obtenus pour la chaux ne peuvent pas être dus seulement à une combinaison de l'acide carbonique dégagé.

Dans d'autres expériences faites par moi, les sols furent placés dans des cylindres en tôle de 50 centimètres de hauteur, de 1 000 centimètres carrés de section, qui furent remplis de la même manière autant que possible. Chaque vase fut muni d'un tube en tôle, de 30 centimètres de longueur, recourbé vers l'extérieur, fermé par un bouchon de caoutchouc et destiné à permettre à l'occasion l'écoulement de l'eau qui, par les grandes pluies, aurait pu se rassembler au fond. Les cylindres furent laissés à l'air libre dans une caisse en bois de 50 centimètres de hauteur. La distance entre les vases et les parois de la caisse était de 30 centimètres, et cet espace était rempli de terre jusqu'au bord de la caisse pour obtenir artificiellement l'échauffement latéral des sols à l'essai. Ceux-ci se composaient de lehm, de sable quartzeux, de sable calcaire[1], mélangés au quart de leur volume avec de la tourbe pulvérisée, et enfin de tourbe pure en gros grains[2]. Le remplissage des vases se fit au printemps de 1880. Les sols restèrent à l'air pendant l'hiver et furent analysés l'année suivante (1881).

La quantité de chaux caustique en mélange fut toujours de 614 grammes pour 50 litres de sol et (si on la rapporte au poids des sols séchés à l'air) de 1 p. 100 (lehm), 0.8 p. 100 (sable quartzeux), 0.9 p. 100 (sable calcaire) et 3.5 p. 100 (tourbe). L'air aspiré d'une

1. Sable calcaire de l'Isar contenant 84.6 p. 100 de calcaire.

2. Provenant des couches inférieures de la tourbière de Schleissheim, près de Munich.

profondeur de 30 centimètres renfermait les doses suivantes moyennes d'acide carbonique :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

DATES.	NOMBRE des dosages.	LEHM + 1/4 de son volume de tourbe		SABLE QUARTZEUX + 1/4 de son volume de tourbe		SABLE CALCAIRE + 1/4 de son volume de tourbe		TOURBE.	
		avec chaux.	sans chaux.	avec chaux.	sans chaux.	avec chaux.	sans chaux.	avec chaux.	sans chaux.
avril-27 septembre 1880.	14	0,500	3,633	0,783	2,481	0,674	3,385	2,439	4,477
avril-17 juin 1881 . .	5	1,939	2,015	»	»	1,570	2,863	»	»
juillet-3 octobre 1881 .	7	3,012	2,674	»	»	3,588	3,233	»	»
avril-4 juillet 1881 . .	6	»	»	1,706	1,721	»	»	2,931	2,579
juillet-3 octobre 1881.	6	»	»	2,315	2,037	»	»	3,895	3,739

A cause de la lenteur de décomposition de la tourbe, j'employai l'année suivante (1882) des matières plus facilement décomposables (du fumier de cheval pulvérisé [1]) et, outre la chaux caustique, j'y mélangeai du carbonate de chaux chimiquement pur. Pour étudier encore une fois la manière dont les corps humiques naturels se comportent vis-à-vis des deux sols calcaires, j'ai expérimenté sur du sable calcaire non fumé riche en humus (sol du champ d'expérience). La quantité de chaux ajoutée était de 500 grammes ; celle de carbonate de chaux de 660 grammes pour 50 litres de sol. Voici les résultats de l'analyse de l'air du sol :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

DATES. — 1882.	NOMBRE d'analyses.	SABLE CALCAIRE humique avec fumier de cheval			SABLE CALCAIRE pur avec fumier de cheval			SABLE CALCAIRE humique, non fumé		
		sans chaux.	avec chaux.	avec calcaire.	sans chaux.	avec chaux.	avec calcaire.	sans chaux.	avec chaux.	avec calcaire.
19 avril-26 mai .	3	16,660	0,120	16,813	10,864	0,512	10,594	2,998	0,276	3,117
4 juin-24 juillet.	4	16,721	21,342	14,874	10,564	8,984	10,113	5,388	5,793	5,491
7 août-22 sept.	4	8,093	4,293	6,975	3,382	3,454	4,061	3,284	2,309	3,059

1. Fumier de cheval desséché, modérément décomposé.

L'action de la chaux caustique se manifeste d'abord par une diminution du taux d'acide carbonique de l'air du sol, conséquence de la fixation de la plus grande partie de l'acide dégagé ; puis vient une période où ce taux s'élève jusqu'à ce que finalement la production d'acide carbonique du sol chaulé tombe de nouveau au-dessous de celle du sol non chaulé. Par l'emploi du carbonate de chaux, le dégagement d'acide est d'abord augmenté et son influence dure plus longtemps que celle de l'hydrate de chaux. Mais ensuite, il se forme moins d'acide carbonique dans le sol pourvu de calcaire que dans celui qui n'a rien reçu.

Si nous résumons les faits acquis jusqu'à ce jour, nous arrivons à la conclusion que *la décomposition des matières organiques non décomposées paraît être retardée par l'addition d'hydrate ou de carbonate de chaux ; celle des matières déjà altérées et pourvues de plus ou moins grandes quantités d'acides humiques paraît être favorisée par les mêmes circonstances.*

L'action de la chaux sur la décomposition des matières organiques déjà altérées repose sur ce fait que les acides humiques, à mesure de leur formation, se combinent à la chaux et que ces combinaisons, comme on l'a souvent admis, se détruisent plus facilement que les acides non combinés. Pour vérifier la justesse de cette hypothèse, j'ai pris de la tourbe de Kolbermoor (près d'Aibling, Haute-Bavière), ayant un faible taux de cendres, et je l'ai arrosée avec une solution de potasse moyennement concentrée pour avoir une solution d'acide humique. Celle-ci, fortement colorée, fut séparée par filtration en deux portions, dont l'une fut incorporée au sol sous forme d'acide humique non combiné, et l'autre fut employée à former de l'humate de chaux qu'on obtint en ajoutant du chlorure de calcium à la solution renfermant l'humate alcalin. Les précipités furent lavés sur filtre à l'eau distillée chaude, séchés et pesés. On détermina la teneur en chaux de l'humate et on prit pour les expériences des portions de ces deux composés renfermant même quantité d'acide humique. On mélangea 86 grammes de sable quartzeux avec 11^{gr},465 d'humate de chaux, correspondant à 10^{gr},483 d'acide humique, et on mouilla avec 5 grammes d'eau (I). Comme cette quantité d'eau était insuffisante, on en ajouta 10 grammes.

La quantité d'air extraite fut d'un demi-litre pour chaque dosage. Le volume d'acide carbonique existant dans 1 000 volumes d'air du sol a été :

		HUMATE de chaux.	ACIDE humique.
I.	Moyenne de 3 dosages.	10,600	4,418
II.	— 10 —	16,129	8,949

L'humate de chaux se détruit donc bien plus vite que l'acide humique pur. Par là s'explique l'action favorable exercée par la chaux, dans les précédents essais, sur la décomposition des matières organiques.

La présence des bases ou des composés à caractères basiques (alcalis et terres alcalines et leurs carbonates) est d'une très grande importance pour la nitrification, comme l'ont montré les recherches de R. WARINGTON[1]. Dans les solutions acides, on l'a déjà dit plus haut, il ne se forme pas d'acide nitrique; *il faut qu'il y ait une base à laquelle celui-ci se combine. Quand toutes les bases disponibles sont neutralisées, la nitrification cesse.* Une solution étendue d'urine fut laissée à elle-même sans autre addition que le ferment nitrique ; l'urine se transforma d'abord en carbonate d'ammoniaque que l'acide nitrique put utiliser comme base, mais qui s'épuisa avec le temps.

Le résultat de l'expérience fut qu'il se forma la moitié seulement de l'acide nitrique qui aurait pris naissance dans les mêmes conditions si la solution avait contenu du carbonate de chaux et de soude ; évidemment la nitrification se serait poursuivie jusqu'à ce que toute l'ammoniaque fût transformée en nitrate d'ammoniaque, puis se serait arrêtée.

D'après WARINGTON, il suffit d'une quantité encore faible de sel alcalin pour que la nitrification soit déjà sérieusement entravée. Le carbonate de soude commence à exercer une influence retardatrice sur le début du phénomène, quand il y en a plus de 300 milligrammes par litre. Dans des solutions qui renfermaient 1 gramme de ce sel par litre, il fut impossible de provoquer la nitrification.

---

1. *Journ. of the chem. Society,* 1884, vol. XLV, p. 637-682.

D'après de récentes recherches[1] du même auteur, le carbonate de soude surtout paraît être un obstacle à la nitrification, tandis que le bicarbonate exerce une très heureuse influence, même à la dose de 1 à 4 grammes par litre. Au delà de ces limites, il a une action retardatrice, comme cela a été observé pour un taux de 6 grammes par litre.

Les résultats des expériences de F. DUMONT et F. CROCHETELLE[2] montrent aussi la faible influence du carbonate de soude sur la nitrification et, au contraire, l'action favorable assez intense du carbonate de potasse. Ils ont opéré sur du sol d'Avilly, qui est en pré de temps immémorial et qui contient par kilogramme 420 grammes de chaux et 68gr,4 d'humus renfermant 11 grammes d'azote organique et 38gr,2 de carbone combiné. Le 10 mai, à 1 kilogr. de ce sol on ajouta diverses quantités de carbonate de potasse ; le tout fut bien mélangé et arrosé à diverses reprises. Au bout d'un mois, on dosa l'azote des nitrates et on obtint les résultats suivants par kilogramme :

Carbonate de potasse.	gr.	0	1	2	3	4	5
Azote (sous forme de nitrate) . .	milligr.	70	160	230	**250**	130	73

tandis que le sol renfermait au début 60 milligrammes par kilogramme.

En juillet, nouveaux dosages qui donnèrent, par kilogramme :

Carbonate de potasse. . . .	gr.	0	1	2	2,5	3	4	5	6	8
Azote (sous forme de nitrate).	milligr.	80	98	140	**160**	127	100	85	80	60

Un troisième essai fut fait avec de la terre provenant des bords d'un fossé d'écoulement. Cette terre faisait une vive effervescence avec les acides et se formait sur les rives d'un ruisseau dans lequel se déversaient des eaux résiduaires de toutes sortes ; elle contenait 28gr,7 de carbone combiné ou 57gr,6 d'humus par kilogramme.

---

1. *On nitrification. Part. IV. A report of experiments mode in the Rothamsted laboratory.* London, Harrison and Sons.

2. *C. R.*, t. CXVII, p. 670-673.

Du 20 juin au 10 juillet, il s'y forma par kilogramme :

Carbonate de potasse	gr.	0	1	1,5	2	2,5	3
Azote (sous forme de nitrate) . . .	milligr.	8	62	91	140	180	105

D'après tous ces chiffres, *la nitrification est activée par l'addition de petites quantités de carbonate de potasse allant jusqu'à 2.5 p. 1 000 ; de plus fortes doses lui sont nuisibles*. Le carbonate de chaux et de magnésie influe dans tous les cas favorablement sur la nitrification ; par contre, le carbonate d'ammoniaque en excès l'empêche, comme WARINGTON l'a démontré. La solution la plus concentrée où ait jusqu'ici commencé la nitrification contenait une quantité de carbonate d'ammoniaque équivalente à 368 milligrammes d'azote. C'est l'influence nuisible d'un excès de ce sel qui empêche les solutions concentrées d'urine de nitrifier. La présence de l'ammoniaque et de ses sels est surtout un obstacle à la formation des nitrates à l'aide des nitrites. Cette antipathie des organismes nitrifiants pour l'ammoniaque explique la marche de la nitrification dans des solutions ammoniacales relativement concentrées (1 gramme par litre) ensemencées avec un peu de terre. Il se forme, dans ce cas, de grandes quantités d'acide nitreux ; l'acide nitrique n'apparaît que quand la dose d'ammoniaque est notablement diminuée.

L'érémacausis est fortement influencée par l'addition de sels à la matière en décomposition ; elle se modifie de diverses façons suivant la nature et la proportion du sel. Voici à peu près ce que l'on peut dire jusqu'alors sur cette question :

Les *sulfates* semblent restreindre l'oxydation du carbone dans l'érémacausis ; c'est du moins le cas pour le sulfate de chaux (gypse). Le fait a déjà été constaté par E. WOLFF[1], qui a trouvé qu'après addition de 200 grammes de gypse par pied cube à du fumier frais, on trouvait, au bout de quinze mois, les quantités suivantes des divers principes exprimées en pour-cent de leur taux dans le fumier frais :

	SANS addition.	AVEC gypse.
Fumier frais	48,8	47,6
Matière organique	33,8	40,0
Azote	67,6	77,5

1. *Landwirthschaftliche Versuchsstationen*, 1859, p. 141.

Le gypse s'est comporté de la même façon dans une expérience que j'ai faite avec un mélange de sable quartzeux (300 grammes), tourbe pulvérisée (5 grammes) et eau (60 centimètres cubes). Les chiffres ci-dessous le montrent :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

	RIEN.	GYPSE.	
		0gr,05.	0gr,1.
	—	—	—
Acide carbonique . . .	3,194	3,029	2,713

L'addition de gypse a diminué la perte en matière organique et même en azote ; le gypse exerce donc une influence retardatrice sur l'érémacausis.

Par contre, les recherches de P. Pichard[1]. R. Warington[2], F. Dumont et F. Crochetelle[3] ont montré que *les sulfates ont une action très favorable sur la nitrification.*

D'après les expériences de Pichard, les sulfates de chaux, de potasse et de soude semblent être les mieux doués sous ce rapport et dépasser les carbonates. Si l'on ajoute à un sol 0.5 p. 100 de ces sels, il nitrifie énergiquement, surtout avec le gypse. En prenant des poids égaux des sels à essayer et, posant le pouvoir nitrifiant du gypse égal à 100, celui des autres sels s'exprime par les chiffres suivants (pour le sol en expérience) :

Sulfate de chaux	100.00
Sulfate de soude	47.91
Sulfate de potasse.	35.78
Carbonate de chaux	13.32
Carbonate de magnésie.	12.52

Pour le climat du sud de la France, la nitrification dans les sols calcaires et gypseux est surtout active aux mois de septembre et

1. *C. R.*, t. XCVIII, p. 1289 ; t. CXIV, p. 490. *Annales agronomiques*, t. X, p. 302 ; t. XV, p. 505 ; t. XVIII, p. 337.

2. *Annales agronomiques*, t. XI, p. 557.

3. *C. R.*, t. CXVII, p. 670.

d'octobre. Dans ce laps de temps, d'après PICHARD, il y a eu en sol calcaire 26.2 p. 100, en sol gypseux 46.3 p. 100 de l'azote total nitrifié.

Cette action du gypse ne se fait remarquer que dans des sols bien perméables; elle n'a pas lieu dans les sols insuffisamment perméables ou qui contiennent trop d'humus acide, parce qu'alors le sulfate de chaux se réduit vite en sulfure de calcium et même en hydrogène sulfuré qui tous deux arrêtent la nitrification. Ces réactions peuvent cependant être évitées si avec le gypse on ajoute au sol du carbonate de chaux et si on l'ameublit à fond.

On peut déduire des recherches de WARINGTON que le gypse détruit l'influence fâcheuse du carbonate d'ammoniaque sur la nitrification. Dans les solutions d'urine pourvues de gypse, celui-ci disparut peu à peu et à sa place il se développa sur les parois du vase des masses cristallines, consistant probablement en carbonate de chaux. Ces dépôts disparurent à leur tour à mesure que progressa la nitrification.

Les essais de F. DUMONT et F. CROCHETELLE prouvent que le sulfate de potasse à certaines doses favorise plus la nitrification que le carbonate de potasse (voir plus haut). En un mois il s'est formé par 1 000 grammes de terre (d'Avilly) les quantités suivantes d'azote nitrique par addition de 0, 1, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6 et 8 grammes, soit de carbonate de potasse, soit de sulfate de potasse :

Avec le carbonate .	milligr.	80	98	140	160	127	100	85	80	60
Avec le sulfate . .	—	80	150	180	220	260	240	270	340	350

Dans la terre de Gally, il s'est produit du 20 juin au 20 juillet :

Azote nitrique.	milligr.	78	420	456	300

pour

Sulfate de potasse . . .	gr.	0	2	5	8

Le sulfate de potasse a donc, à certaines doses, très fort accéléré la nitrification, qui se ralentit au contraire, si on emploie ce sel en trop fortes quantités. Cette influence varie, d'après ces mêmes au-

teurs, suivant les doses d'humus en présence, comme le montrent les chiffres suivants :

Azote nitrique produit en quinze jours dans 1 000 grammes de terre.

	TERRE avec 29 gr. d'humus par kilogr.		TERRE avec 10gr,8 d'humus.	
	milligr.	milligr.	milligr.	milligr.
Telle quelle	39	En excédent	28	En excédent
Avec carbonate de potasse .	68	29	32	4
Avec sulfate de potasse . .	80	41	46	18

On voit que l'excès d'azote nitrique, provoqué par l'addition des sels alcalins, s'amoindrit à mesure que le sol est plus pauvre en humus.

Le sulfate de fer, d'après P. Pichard[1], tant qu'il ne trouve pas à s'oxyder, exerce sur la nitrification la même influence que le gypse, quoique à un moindre degré. Dans les sols perméables, il empêche au contraire la nitrification, comme on peut le conclure de ce fait que les doses de nitrate du sol sont inversement proportionnelles au sulfate de fer qui s'y trouve. Ainsi M. Mærcker[2], expérimentant sur des sols tourbeux, a trouvé, dans 100 parties de sol sec :

	ACIDE nitrique.	FER soluble.
Sol cultivé d'une manière permanente. . .	0,0956	0
Sol non cultivé	0	1,349
Sol autrefois cultivé	0,0088	0,298

L'action nuisible du sulfate de fer sur la nitrification, action qui ressort des chiffres précédents, tient surtout à ce qu'il fixe énergiquement l'oxygène de l'air ambiant et se transforme en sel au maximum. Les phosphates ont, en général, sur l'oxydation du carbone comme sur la nitrification, une influence favorable, à moins qu'ils n'existent à l'état soluble en trop fortes quantités.

Les chlorures possèdent, comme on sait, des propriétés antisep-

1. *C. R.*, t. CXII, 1891, p. 1455.
2. *Zeitschrift des landw. Centralvereins für die Provinz Sachsen*, 1874, p. 70.

tiques et antifermentescibles très nettes ; il n'est donc pas étonnant que, même à faibles doses, ils entravent l'activité des microorganismes de la décomposition. J'ai montré [1] que le chlorure de sodium diminue fortement l'oxydation du carbone. J'ai soumis à l'érémacausis un mélange de 400 grammes de sable quartzeux et 2 grammes de fumier de cheval en poudre, arrosé de 40 centimètres cubes d'eau distillée et de solutions de sel marin diversement concentrées. Les quantités d'acide carbonique dégagées en vingt-quatre heures sont indiquées ci-dessous (moyenne de neuf dosages) :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

Matière ajoutée	RIEN.	SOLUTION DE SEL MARIN.				
		p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Concentration de la solution.	»	0.5	1	5	10	20
(En pour-cent du sol) . . .	»	(0.05)	(0.1)	(0.5)	(1.0)	(2.0)
Acide carbonique	**17.288**	**15.316**	**10.737**	**8.237**	**6.174**	**1.753**

Le chlorure de sodium, même à faible dose, ralentit l'oxydation du carbone et d'autant plus que le taux de sel de la masse est plus élevé.

Relativement à l'action du sel marin sur la nitrification, P. P. Dehérain [2], en opérant sur de la terre à laquelle il ajoutait des doses de sel variant de 0,1 à 2 grammes par 100 grammes, a trouvé que de petites additions n'avaient pas d'effet nuisible, mais qu'avec des doses trop fortes cet effet se produisait et d'autant plus que l'expérience durait plus longtemps. Avec $0^{gr},5$ de chlorure de sodium par 100 grammes de terre, la nitrification s'arrêtait.

Le chlorure de potassium paraît avoir une action moins défavorable en ce sens que, d'après les recherches de F. Dumont et F. Crochetelle [3], à petites doses il accélère la nitrification, quoique, comme le montrent les chiffres ci-dessous, dans une faible mesure, bien moindre que le sulfate et le carbonate. L'azote nitrique formé en un mois dans 100 grammes de terre d'Avilly s'éleva pour les

1. *Journ. f. Landw.*, 1886, p. 271.
2. *Annales agronomiques*, t. XIV, 1888, p. 289-320.
3. *C. R.*, t. CXVII, p. 670-773.

doses de 0, 1, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6 et 8 grammes de chacun des trois sels à :

80	75	78	100	100	78	80	70	»	milligr.	avec le chlorure de potassium ;
80	98	140	160	127	100	85	80	60	—	avec le carbonate de potasse ;
80	150	180	220	260	240	270	340	350	—	avec le sulfate.

Dans un sol riche en humus, l'addition de 2 millièmes de ces sels a provoqué en quinze jours par kilogramme de terre les quantités suivantes d'azote nitrique :

Matière ajoutée. . . .		RIEN.	CHLORURE de potassium.	CARBONATE de potasse.	SULFATE de potasse.
		—	—	—	—
Azote nitrique	milligr.	39	57	68	80

Le chlorure de potassium n'a donc qu'une influence modérée sur la nitrification.

Pour apprécier la mesure dans laquelle les nitrates influent sur la décomposition, j'ai humecté[1] un mélange de 400 grammes de sable quartzeux et 2 grammes de fumier de cheval en poudre, soit avec 40 centimètres cubes d'eau, soit avec des solutions de nitrates diversement concentrées et j'ai trouvé les chiffres suivants, moyennes de sept dosages :

Volume d'acide carbonique dans 1 000 volumes d'air.

Matière ajoutée. . .	EAU.	SOLUTION DE NITRATE DE SOUDE.				
	—	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Concentration de la solution	»	0.5	1	5	10	20
En pour-cent du sol.	»	0.05	0.10	0.50	1.0	2.0
Acide carbonique. .	**16.366**	**18.041**	**17.131**	**10.245**	**6.821**	**4.452**

Concluons que des solutions diluées de nitrates favorisent l'oxydation du carbone, tandis que des liqueurs concentrées la ralentissent, et cela proportionnellement à leur degré de concentration. Leur

---

1. *Journ. f. Landw.*, 1886. p. 270.

influence sur la nitrification a été étudiée par P. P. Dehérain[1]. Il prit de la terre qui contenait $2^{gr},61$ d'azote par kilogr., la mit, avec ou sans addition de nitrate de soude, dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau et y dosa les nitrates à des intervalles déterminés. Voici ses résultats :

Azote nitrique par 1 000 kilogr.

	SOL avec rien.	SOL avec $0^{gr},06$ p. 100 de nitrate de soude.	SOL avec $0^{gr},6$ p. 100 de nitrate de soude.
	gr.	gr.	gr.
Après 31 jours . .	1,32	0,00	0,33
Après 39 jours . .	1,27	0,33	0,00
Après 70 jours . .	1,48	0,75	0,58
Après 105 jours . .	0,63	0,80	0,44

On doit en conclure qu'une assez forte dose de nitrates ajoutée au sol empêche d'abord la nitrification, mais que, comme le montre nettement l'essai avec $0^{gr},06$ de nitrate, le ferment nitrique peut s'habituer peu à peu à ces nouvelles conditions.

Mentionnons enfin, pour être complet, que si l'on incorpore à un sol des sels ammoniacaux en quantités croissantes, la production de l'ammoniaque diminue aussi progressivement, comme il résulte de diverses expériences de A. Hébert[2], dont nous citerons seulement quelques chiffres :

Azote ammoniacal (en milligrammes).

	AU DÉBUT de l'expérience.	A LA FIN de l'expérience.	DIFFÉRENCE.
Sol tel quel	2,90	12,94	+ 10,04
+ $0^{gr},010$ sulfate d'ammoniaque.	4,09	13,33	+ 9,24
+ $0^{gr},020$ — —	5,46	14,38	+ 8,92
+ $0^{gr},050$ — —	11,54	19,77	+ 8,23
+ $0^{gr},100$ — —	23,18	26,65	+ 3,47
+ $0^{gr},150$ — —	27,65	29,84	+ 2,19
+ $0^{gr},200$ — —	39,80	38,99	— 0,81

1. *Loc. cit.*
2. *Annales agronomiques,* t. XV, 1889, p. 355-369.

Ces chiffres montrent nettement que la production d'azote ammoniacal diminue avec la quantité de sel ammoniacal ajouté et que la formation d'ammoniaque cesse à partir de certaines limites.

Si l'on jette un coup d'œil d'ensemble sur les faits énoncés dans ce chapitre, on peut, en négligeant les détails, les résumer en ces quelques lois :

1° Les acides minéraux et les solutions salines trop concentrées entravent les réactions qui se passent dans l'érémacausis (formation d'acide carbonique, d'ammoniaque, nitrification) et d'autant plus énergiquement que les doses de ces substances sont plus fortes ;

2° Une faible alcalinité de la matière organique favorise l'oxydation du carbone et de l'azote ;

3° La présence de bases et de composés ayant ce caractère (alcalis, carbonates alcalins [ceux-ci à faibles doses], surtout terres alcalines et leurs carbonates) sont, en dedans de certaines limites, indispensables à la nitrification ;

4° L'oxydation du carbone dans l'érémacausis est diminuée par l'addition de chlorures et de sulfates, augmentée au contraire par celle de phosphates et de nitrates, en admettant que la concentration de la solution ne dépasse pas certaines limites, à partir desquelles les sels ont une action nuisible ;

5° La nitrification s'accélère par l'adjonction à petites doses de sulfates et de phosphates, tandis que les chlorures, surtout celui de sodium, ralentissent ce processus dans les mêmes circonstances.

2. — Conditions de la putréfaction.

L'existence et l'activité des microbes de la putréfaction sont naturellement liées à certaines circonstances extérieures qui, par leurs variations, provoquent les phénomènes complexes de cette sorte de décomposition. En premier lieu, il y a à considérer les exigences au point de vue de l'oxygène. Les organismes dont il est ici question, qui comptent parmi les anaérobies proprement dits, comme, par exemple, le *Bacillus butyricus,* se nourrissent parfaitement sans oxygène ; le libre accès de l'air ralentit ou suspend leur végétation.

Pourtant, quelques formes semblent ne pouvoir exister que si on leur fournit de temps en temps de l'oxygène. L'observation de NENCKI et NÆGELI est à noter, que des bactéries, agents de fermentation, vivent très bien sans oxygène si elles se trouvent dans une solution appropriée, apte à fermenter, mais que ces mêmes bactéries ne peuvent plus se développer qu'en présence d'oxygène si elles ont à leur disposition un liquide nutritif moins favorable.

Comme chaque processus de végétation dépend de la température du milieu ambiant, celui des bactéries de la putréfaction est aussi essentiellement régi par les rapports de température, ainsi qu'il a déjà été exposé pour celles de l'érémacausis. D'après les faits précédents, les organismes en question peuvent végéter dans de très larges limites de température, et leur optimum est très élevé.

Le *Bacterium Termo*, par exemple, peut végéter entre 5° et 40° ; son optimum gît entre 30° et 35°. Le *Bacillus butyricus* a, d'après FITZ, son optimum vers 40°, son maximum vers 45°. Les températures de germination paraissent être plus élevées que le minimum indiqué, du moins pour quelques espèces.

Quant aux limites inférieures de température, on peut les considérer comme n'existant pas en réalité, tant est grand le nombre des bactéries qui peuvent supporter, sans périr, les températures les plus basses. La limite supérieure, qui provoque la mort des cellules végétatives de la plupart des formes, est à peu près la même que pour la généralité des autres plantes, c'est-à-dire 50-60° centigrades. Quelques-unes résistent pourtant à des températures de plus de 100°. La composition chimique et physique du milieu nutritif n'est pas de moindre importance pour la présence et le développement des diverses espèces que les conditions de température : cela résulte de nombreuses observations.

On est seulement en train de faire des recherches plus approfondies sur les conditions spéciales de la vie de ces microbes ; ce que nous venons d'en dire est suffisant[1].

---

1. Voir pour le surplus les développements du chapitre VI.

3. — Conditions des autres processus de décomposition.

De même que l'érémacausis et la putréfaction, les autres fermentations qu'on observe dans la destruction des matières organiques sont régies par des agents extérieurs qui sont principalement l'oxygène, la température, l'humidité, la composition physique et chimique du substratum. Que sont dans chaque cas ces influences? Cela dépend des conditions biologiques des organismes participants et se peut suffisamment apprécier d'après ce qui a été dit au chapitre VI.

Pour la fermentation ammoniacale de l'urine, qui offre de l'intérêt au point de vue agricole, les recherches de A. Ladureau[1] ont établi que la fermentation a lieu aussi bien en présence de l'air, c'est-à-dire de l'oxygène, qu'en présence de l'azote, de l'hydrogène, du protoxyde d'azote et de l'acide carbonique ; mais elle est très affaiblie dans ces derniers cas, particulièrement avec l'hydrogène et l'acide carbonique, comme le montrent les chiffres suivants :

Ammoniaque par litre.

GAZ INTRODUIT.	APRÈS 20 jours.	40 jours.
—	—	—
	gr.	gr.
Air.	8,77	10,23
Oxygène.	2,79	8,99
Azote.	8,13	9,19
Hydrogène.	3,76	6,68
Protoxyde d'azote	7,60	9,12
Acide carbonique. . . .	0,97	5,94

Ladureau a trouvé qu'en ajoutant de l'acide phosphorique, du monophosphate de chaux et de la chaux caustique à une liqueur renfermant 2 p. 100 d'urine, la fermentation ammoniacale subit une dépression correspondant à la quantité de matière ajoutée.

A. Müller[2] dernièrement expérimenta sur de l'urine provenant d'un homme sain (soumis à une nourriture substantielle régulière et à une abondante consommation d'eau) et employée à divers degrés

1. *C. R.*, t. XCIX, 1884, p. 877 ; *Annales agronomiques,* t. XI, 1885, p. 272 et 252.

2. *Landw. Versuchsstationen,* vol. XXXII, 1885, p. 271.

de dilution, à l'état frais ou fermenté, avec ou sans addition[1]. Plusieurs essais furent faits avec du carbonate d'ammoniaque. Parmi les principaux résultats il faut d'abord signaler que la réaction de la liqueur soit acide, soit alcaline, est décisive pour l'énergie de la fermentation de l'urine. L'addition de bases, à moins qu'il ne s'agisse de lessives alcalines concentrées, agit favorablement ; celle d'acides gêne très nettement la fermentation. Sous ce rapport, les organismes inférieurs en question se comportent comme ceux qui interviennent dans les processus d'oxydation des matières organiques.

4. — Résultats généraux.

En s'appuyant sur les considérations et les résultats qui précèdent on voit que la présence et l'activité des divers organismes inférieurs qui régissent les différents processus de décomposition sont soumises à des conditions déterminées. On a montré que pour les deux processus les plus importants sous les rapports agronomique et hygiénique, l'érémacausis et la putréfaction, la qualité disponible d'air est le facteur dominant. *Tant que l'oxygène peut arriver librement jusqu'à une certaine dose, ce sont les phénomènes d'oxydation* (*érémacausis*) *qui entrent en jeu ; quand l'accès de l'air est insuffisant ou nul, ce sont les phénomènes de réduction* (*putréfaction*). Relativement aux conditions dans lesquelles s'exerce chaque réaction, on peut, d'après ce qui vient d'être dit, les résumer en cette loi : *Toutes les fonctions des microorganismes qui participent aux décompositions se manifestent à partir d'une limite inférieure* (*minimum*), *s'exaltent jusqu'à un certain degré* (*optimum*) *pour lequel elles s'exercent avec le plus d'activité, puis elles diminuent au delà, à mesure que l'intensité du facteur s'accroît, pour cesser finalement lorsque cette intensité atteint un certain degré* (*maximum*), *ou prendre un caractère essentiellement différent du précédent à la suite de la pullulation d'autres organismes dont la multiplication et l'activité ont été excitées par les modifications des conditions biologiques.*

L'influence de chaque facteur peut, d'après cela, se représenter

---

1. Les doses des substances ajoutées à l'urine étaient comprises entre 0,25 et 0,63 par 100 centimètres cubes.

par une courbe ascendante et descendante déterminée par un système de coordonnées où les abscisses figureraient l'intensité du facteur et les ordonnées son influence. Figurons l'influence de la température sur la nitrification. D'après SCHLŒSING, les limites extrêmes sont 5° et 55°, l'optimum est 37°. On obtient avec ces données la courbe de la figure 44. Pour les autres facteurs et réactions, on a des figures analogues.

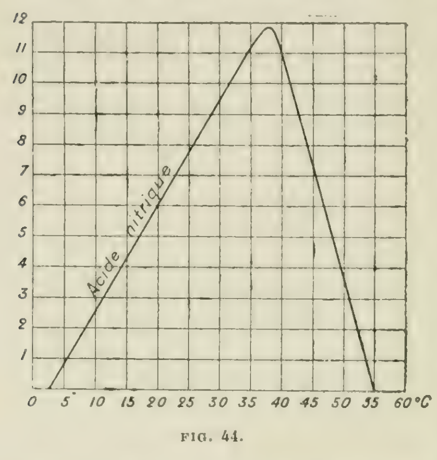


FIG. 44.

De tous ces faits il ressort avec évidence que *les lois qui ont été déterminées pour la végétation des plantes supérieures s'appliquent aussi à celle des organismes inférieurs*. Il faut en conclure encore que les facteurs importants, s'ils agissent dans le même sens, se prêteront un mutuel appui et que l'activité des organismes atteindra son maximum quand toutes les conditions extérieures seront les plus favorables. Donc, à doses égales de matières organiques, l'érémacausis, par exemple, sera d'autant plus intense que la chaleur et l'humidité seront à leur optimum. Une de mes expériences le montre nettement.

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

TAUX D'EAU p. 100.	TEMPÉRATURE DU SOL (terre de compost).				
	10°	20°	30°	40°	50°
6.79	2,03	3,22	6,86	14,69	25,17
26.79	18,38	54,24	63,50	80,06	81,52
46.79	35,07	61,49	82,12	91,86	97,48

Dans la nature, les influences des divers facteurs agissent rarement dans le même sens ; le plus souvent c'est en sens contraire, ce qui amène dans le résultat des modifications multiples.

Ainsi, par exemple, l'influence de la température peut être favorable ou défavorable, suivant que la quantité d'eau de la matière est

suffisante ou non. L'exemple suivant, tiré d'une de mes expériences, est très instructif à cet égard :

Volume d'acide carbonique dans 1000 volumes d'air.

	TEMPÉRATURE DU SOL (terre de compost)				
	10°.	20°.	30°.	40°.	50°.
Taux d'eau . . . . . p. 100	46,8	36,8	26,8	16,8	6,8
Acide carbonique. . .	**33,18**	**62,27**	**73,23**	**66,83**	**14,42**

Les températures les plus élevées (40° et 50°) n'ont pu produire leur plein effet, parce que l'eau existait dans le sol en quantité insuffisante. De même, les taux d'humidité qui accélèrent le plus la décomposition (46.8 p. 100 et 36.8 p. 100) ne se sont pas montrés sous ce jour, parce qu'il y avait en même temps des températures défavorables. Ces rapports sont représentés par le graphique de la figure 45 qui se passe de commentaire.

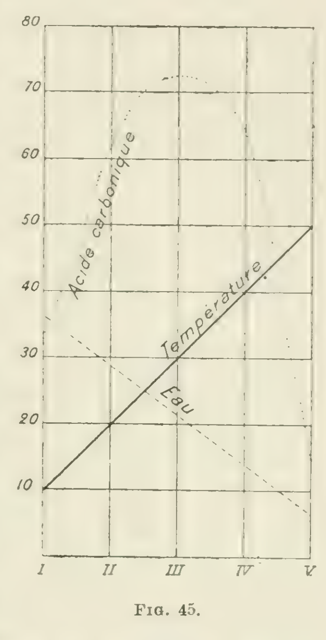


Fig. 45.

Les autres agents qui influent sur l'activité des microorganismes se comportent comme l'eau et la chaleur ; on ne peut en douter d'après ce qui vient d'être dit.

Donc on peut formuler cette loi importante dans l'appréciation des processus de la décomposition des matières organiques : **ils sont régis en quantité et en qualité par le facteur qui intervient soit au minimum, soit au maximum.**

D'une part, cette loi aide beaucoup à comprendre la succession des réactions extrêmement compliquées qui se passent dans la nature (chap. VIII) ; d'autre part, elle rend possible l'emploi de toute une série de mesures pratiques destinées à régulariser ces réactions (voir la III[e] partie).

CHAPITRE VIII

DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LA NATURE

1. — Climat et température.

Puisque deux facteurs aussi importants pour la décomposition des matières organiques que la température et l'humidité se montrent de par le monde avec une intensité plus ou moins grande et variable à chaque instant suivant la marche moyenne et les sauts brusques des éléments météorologiques, il est évident que cette décomposition elle-même présentera les plus grandes variations à la surface du globe suivant les localités.

Abstraction faite des influences locales, constatons d'abord que la diminution de la température de l'équateur aux pôles ou des plaines aux sommets des montagnes se lie à une diminution correspondante de l'intensité des processus de décomposition et que, par suite, les accumulations de matières organiques sont en général plus abondantes dans les régions du nord ou dans les lieux élevés que dans les régions du sud et dans les plaines basses. Ces différences augmentent avec la quantité des pluies, parce que, dans les contrées chaudes, la destruction des matières organiques est favorisée par leur humidité et que, dans les lieux plus froids, les accumulations de grandes masses d'eau nuisibles à la décomposition se forment facilement par la réduction de l'évaporation.

En second lieu, les influences du climat sur les points en question dépendent de la distribution locale des deux facteurs que nous étudions. Là où les précipitations sont abondantes et tellement réparties que l'humidité subit des variations moindres que la température, celle-ci règle en général la décomposition.

Cela a été démontré pour diverses localités par la détermination du taux de l'air du sol en acide carbonique, taux qui, toutes circonstances égales, peut servir à mesurer l'intensité de cette décomposition. Pour mettre ces rapports en évidence, nous citerons les chiffres obtenus à Dresde par H. FLECK[1] dans des recherches qui ont duré trois ans.

Déterminations de la température et de l'acide carbonique du sol.

(La température est exprimée en degrés centigrades, l'acide carbonique en volume pour 1000.)

	A 2 MÈTRES DE PROFONDEUR.					
	1873.		1874.		1875.	
	Température.	CO^2	Température.	CO^2	Température.	CO^2
Janvier	6,88	7,1	5,75	11,4	5,60	14,6
Février	5,30	**7,0**	**4,82**	**10,1**	4,63	11,4
Mars	**5,29**	8,7	5,11	10,2	**3,56**	**9,1**
Avril	10,19	14,5	7,61	14,3	5,89	13,6
Mai	10,07	18,8	9,66	14,2	9,54	21,8
Juin	13,28	28,4	14,70	26,1	10,98	32,6
Juillet	16,18	**44,3**	17,41	37,5	16,62	36,6
Août	**18,09**	43,5	**17,66**	**37,7**	**17,88**	**48,3**
Septembre	17,41	41,4	16,63	36,6	17,30	44,3
Octobre	14,84	39,8	15,67	32,0	14,40	32,4
Novembre	11,12	20,1	10,55	19,0	10,06	24,0
Décembre	8,01	19,3	7,28	15,2	6,30	14,2

On voit par ces chiffres que *le taux d'acide carbonique de l'air occlus dans le sol croît et décroît avec la température du sol;* c'est quand le sol atteint sa température maximum qu'il est le plus riche en acide carbonique ; c'est quand il arrive à son minimum de chaleur qu'il est le plus pauvre.

Les recherches faites à l'instigation de M. VON PETTENKOFER[2] sur le taux d'acide carbonique dans un terrain d'éboulis à Munich ont conduit à des résultats absolument semblables. Étant donnée la simi-

---

1. *Zweiter Jahresbericht der chemischen Centralstelle für öffentliche Gesundheitspflege in Dresden,* 1873, p. 15-49 ; 1874, p. 3-24.

2. *Zeitschrift für Biologie,* vol. VII, 1871, p. 395-417 ; vol. IX, 1873, p. 250-257. Voir aussi G. WOLFFHÜGEL, *ibid.,* vol. XV, 1879, p. 98-114.

litude des conditions climatériques d'une grande partie de l'Europe moyenne, on peut admettre que la quantité d'acide carbonique contenue dans l'air du sol, c'est-à-dire la décomposition des matières organiques, y augmente sensiblement du printemps à l'été, puis diminue constamment en automne et en hiver. Ceci se présentera d'autant plus nettement que les localités considérées seront situées dans la région des pluies d'été et qu'alors le plus fort taux d'humidité coïncidera avec la température la plus élevée.

Dans les pays où la température est assez uniforme, tandis que les précipitations subissent des variations importantes, c'est l'humidité qui est le facteur dominant du phénomène. On observe surtout ce fait dans les contrées tropicales, où des périodes de sécheresse persistante alternent avec des périodes de pluies abondantes. Les hautes températures des premières ne peuvent avoir tout leur effet sur les processus de décomposition, parce que le taux d'humidité des matière est insuffisant, vu la forte évaporation ; quand celles-ci sont humidifiées à l'entrée de la saison des pluies, la décomposition s'accélère jusqu'à une certaine limite pour se ralentir après la fin des pluies, comme le montre clairement le taux d'acide carbonique du sol. Ainsi, par exemple, d'après les observations de T. R. Lewis et D. D. Cunningham[1] dans les Indes (Calcutta), le taux d'acide carbonique libre du sol a une marche parallèle à celle des pluies. A l'époque des plus grandes précipitations on a trouvé, de la manière la plus nette, à trois pieds de profondeur, une augmentation d'acide carbonique jusqu'à un maximum à partir duquel il descend vers un minimum après la cessation des pluies.

Des différences analogues se constatent dans d'autres pays et d'autres climats. Ainsi, l'Italie du Nord (et spécialement la plaine lombardo-vénitienne) est caractérisée par des pluies assez abondantes et des variations de température relativement grandes, tandis que dans le sud et surtout en Sicile les pluies sont rares, mais la température est élevée et assez régulière[2].

---

1. *Eleventh annual report of the sanitary commission with the government of India,* 1874.

2. C. Ferrari, *Annali di agricoltura,* 1883 ; Roma, 1884.

D'après les résultats obtenus dans l'Europe moyenne et dans l'Inde, on devra admettre *à priori* que, dans le nord de l'Italie, l'intensité de la décomposition dépendra surtout de la température et, dans le sud, de l'humidité. Entre le climat humide des îles ou des côtes maritimes et le climat sec de l'intérieur des continents, il y a des différences de même ordre sous le rapport qui nous occupe.

Cette lutte d'influence entre la température et l'humidité se présente aussi, naturellement, pour de courts intervalles, si bien que, dans une localité déterminée, l'influence du climat s'exprime d'une manière plus ou moins nette. Dans chaque cas, ainsi qu'il ressort suffisamment des exemples précédents, les réactions sont influencées suivant la loi générale du minimum et du maximum formulée plus haut et peuvent se mesurer approximativement par l'étude des facteurs extérieurs de la décomposition sans qu'il soit besoin d'expériences spéciales. On n'aura à pénétrer plus avant dans ces réactions si compliquées qu'au cas où entreront en jeu certaines influences locales décisives pour la constitution du matériel à décomposer, et telles que celles dont il va être question dans les chapitres suivants.

2. — Sol.

En dehors des influences du climat et de la température, les réactions qui ont lieu dans le sol lors de la décomposition des matières organiques dépendent essentiellement de ses propriétés physiques, surtout de l'aptitude à l'échauffement, à l'imbibition et à la perméabilité.

De quel genre sont ces influences particulièrement intéressantes pour l'agriculture ? C'est ce que nous allons exposer brièvement.

L'*exposition,* c'est-à-dire l'inclinaison du terrain vers un point de l'horizon, a une grande importance pour l'humidité et la température du sol et, par suite, pour les réactions qui s'y passent.

Relativement à l'humidité, j'ai montré[1] que *les pentes exposées*

1. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik,* édité par E. Wollny, Heidelberg. C. Winter, vol. X, 1887, p. 3-8.

au nord sont les plus humides, puis viennent les expositions ouest, est, et ce sont les expositions sud qui sont les plus sèches. Cela ressort nettement des chiffres suivants obtenus par dessiccation d'échantillons d'un sol portant du maïs :

Taux d'eau du sol jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

	INCLINAISON DE 15°			
	vers le nord.	vers le sud.	vers l'est.	vers l'ouest.
Moyenne de 14 dosages. . p. 100.	19.13	16.24	17.96	18.67

Comme l'humidité, la température d'un seul et même sol est modifiée par l'exposition ; *celle du sud est la plus chaude, puis viennent celles de l'est et de l'ouest, et enfin celle du nord qui est la plus froide.* Cette loi se déduit des résultats que j'ai obtenus[1] sur un sol de sable calcaire riche en humus portant du maïs :

Température moyenne du sol à 15 centimètres de profondeur.

	INCLINAISON DE 15°			
	vers le nord.	vers le sud.	vers l'est.	vers l'ouest.
Moyenne de 48 observations du 5 au 8 juillet	24°,61	25°,51	25°,30	24°,99

Ces différences s'exagèrent par une insolation continue et une haute température.

L'influence des deux facteurs principaux pour la décomposition des matières organiques (eau et chaleur) étant sensiblement modifiée par l'exposition, il faut conclure que l'intensité des processus qu'ils déterminent varie dans le même sens. Pour le prouver, j'ai fait[2] des dosages d'acide carbonique dans des sols à diverses expositions.

1. *Ibid.,* vol. X, 1887, p. 8-54.
2. *Ibid.*, vol. IX, 1886, p. 170-174.

En voici les résultats :

Taux d'acide carbonique dans l'air du sol (en volume pour 1000). — Sol nu.

TEMPS GÉNÉRALEMENT HUMIDE					TEMPS GÉNÉRALEMENT SEC				
DATES. — 1880.	INCLINAISON DE 18°				DATES. — 1881.	INCLINAISON DE 18°			
	vers le sud.	vers l'est.	vers l'ouest.	vers le nord.		vers le sud.	vers l'est.	vers l'ouest.	vers le nord.
22 avril .	0,902	1,145	0,799	1,589	14 avril .	2,063	1,802	2,639	2,450
4 mai. .	0,792	0,969	0,971	1,197	1er mai. .	1,883	1,967	1,384	1.385
14 mai. .	1,932	1,489	1,891	1,770	16 mai. .	1.861	2,127	2,253	2,665
25 mai. .	2,224	2,388	1,918	2,975	1er juin. .	4,604	4,222	4,454	4.388
3 juin. .	3,068	1,991	3,014	1,299	15 juin. .	3,699	3,732	3,394	3,100
14 juin. .	2,033	1,754	1,919	1,351	1er juillet.	3,571	3,727	3,271	4,005
26 juin. .	3,993	4,093	4,041	3,098	15 juillet.	3,669	3,413	3,255	3,929
6 juillet.	7,461	6.243	4,997	3,905	1er août .	3,884	3,670	3,803	3,821
17 juillet.	5,548	3,288	3,113	3,674	16 août .	2,219	1,939	1,852	3.381
29 juillet.	2,499	2,749	2,400	2,374	1er sept. .	4,318	3,826	3,443	3,921
11 août .	1,305	2,165	1.309	1,018	15 sept. .	2,072	2,143	2,422	2,488
30 août .	1,741	2,013	2,624	2,452	1er oct. .	1.889	1.874	1,756	2,607
14 sept. .	1,665	0,862	1,901	1,939					
27 sept. .	1,372	1,376	1,167	1,773					
Moyenne.	**2,609**	**2,323**	**2,290**	**2,172**	Moyenne.	**2,978**	**2,870**	**2,827**	**3,095**

En rapprochant ces chiffres des différences assez importantes dans l'humidité et la température de ces sols diversement exposés, on est frappé de voir que les différences dans les taux des produits gazeux de la décomposition (acide carbonique) ne ressortent pas nettement. Cela peut tenir en partie à ce que les échantillons n'ont été pris qu'à une faible profondeur (20 centimètres) à laquelle l'air du sol se diffuse facilement dans l'atmosphère. Ajoutons que les vents, en influençant diversement la surface, ont pu modifier les effets de la température et de l'humidité. Au reste, sans tenir compte de ces circonstances accessoires, il faut chercher la cause du fait dans ce que les deux facteurs dominants (eau et chaleur) se contrecarrent en partie dans ces sols diversement exposés. Ceux qui regardent le sud sont les plus chauds, mais aussi les plus secs ; ceux qui regar-

dent le nord sont les plus froids, mais en même temps les plus humides. Bien souvent l'échauffement plus fort du versant sud ne pourra produire que peu ou pas de supplément d'oxydation du carbone, parce que l'humidité nécessaire fera défaut. Inversement, dans le sol exposé au nord, la décomposition des matières organiques trouverait bien, il est vrai, un adjuvant dans l'augmentation du taux d'eau, mais la température trop basse s'opposera à ce que ce facteur rende son plein effet. Ainsi s'explique que les différences dans les taux d'acide carbonique de l'air du sol soient relativement faibles.

Si l'on examine séparément les dosages, on voit que le temps a une influence décisive sur la prépondérance de l'un ou l'autre des deux facteurs étudiés. En 1880, année humide, l'air occlus dans le sol a presque toujours été plus riche en acide carbonique sur les versants sud que sur les versants nord, parce qu'alors l'effet de l'excès de température des premiers pouvait se manifester.

Dans l'année 1881, généralement sèche, l'influence de la chaleur sur la production de l'acide carbonique fut plus ou moins entravée par le manque d'humidité, si bien que le taux de ce gaz dans les versants sud descendit au-dessous de celui des versants nord plus humides.

Ce n'est que dans certains cas, par exemple les 1er et 15 juin et le 1er septembre, quand de fortes pluies avaient bien humecté le sol, que l'échauffement relativement plus grand des sols exposés au sud amena un surcroît de production de gaz. Il résulte de ces faits que *le maximum du taux d'acide carbonique de pentes à diverses expositions subit des variations dans des périodes plus ou moins longues ; par la sécheresse, le sol des versants nord est généralement plus riche en acide carbonique que celui des versants sud ; si le sol est bien humecté par les pluies, c'est le contraire qui arrive.*

Si nous considérons ici seulement les versants nord et sud, c'est parce qu'ils présentent les écarts maximums sous le rapport de l'échauffement et de l'humidité, et qu'on peut alors saisir le mieux sur eux l'influence de ces deux facteurs ; on s'est dispensé d'étendre ces considérations aux versants est et ouest, parce que leurs relations avec les points étudiés se déduisent de ce qui vient d'être dit, en retenant que, sous tous les rapports, ils se placent entre les deux autres versants (nord et sud).

L'inclinaison ou *pente* amène des différences en ce sens que *le sol horizontal est plus humide que le sol en pente, et celui-ci est d'autant plus sec que la pente est plus forte.*

C'est ce que montrent les chiffres suivants extraits d'une assez longue série de recherches que j'ai faites à ce sujet[1] :

Taux d'eau du sol jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

I. Pente exposée au sud et plantée en féveroles.

	PENTE.			
	0°.	10°.	20°.	30°.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Moyenne de 4 dosages . . .	16,42	15,17	13,70	12,72

II. Pentes à diverses expositions et garnies de maïs.

ANGLE DE PENTE.	Nord.	Sud.	Est.	Ouest.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
15°.	19,13	16,24	17,96	18,67
30°.	17,81	14,59	15,07	16,43

Pendant la saison chaude, *le sol à l'exposition sud et dans certaines limites est d'autant plus chaud, à l'exposition nord il est d'autant plus froid que la pente est plus forte, tandis que l'influence de l'inclinaison sur l'échauffement est très faible aux autres expositions.* Mes expériences, dont je donne ci-dessous quelques résultats, militent en faveur de cette opinion[2] :

Température moyenne du sol à 15 centimètres de profondeur.

I. Terrain nu exposé au sud.

	INCLINAISON.			
	0°.	10°.	20°.	30°.
Moyenne de 60 observations. .	24,03	25,45	26,04	26,58

II. Terrains à diverses expositions.

ANGLE DE PENTE.	Nord.	Sud.	Est.	Ouest.
15°	24,61	25,51	25,30	24,99
30°	24,19	26,38	25,73	24,87

1. *Forschungen, etc.*, vol. IX, 1886, p. 1-10 ; vol. X, 1887, p. 3-8.
2. *Forschungen, etc.*, vol. IX, 1886, p. 10-70 ; vol. X, 1887, p. 8-54.

Les dosages d'acide carbonique relatés ci-dessous et que j'ai faits sur des pentes exposées au sud[1] établissent à quel degré la décomposition des éléments organiques est influencée par les circonstances d'humidité et de température variables avec l'inclinaison de la surface.

Taux d'acide carbonique dans l'air du sol. — Volume pour 1 000, à 20 centimètres de profondeur. — Terre nue.

DATES.	PENTE INCLINÉE		
	à 10°.	à 20°.	à 30°.
22 avril 1880	2,456	3,265	1,407
4 mai	1,657	1,996	0,966
14 —	3,472	3,746	2,500
25 —	2,851	3,853	2,012
3 juin	2,842	4,582	2,378
14 —	3,908	4,584	2,234
26 —	4,461	6,524	2,869
6 juillet	8,716	9,094	5,104
17 —	5,054	7,686	4,266
29 —	3,368	4,894	2,488
11 août	1,232	3,254	1,620
30 —	4,461	3,431	2,471
14 septembre	1,752	3,105	1,418
28 —	1,315	2,855	1,813
Moyenne	**3,396**	**4,491**	**2,393**

Il ressort de là que *le taux d'acide carbonique atteint son maximum avec une certaine pente (20°), tandis qu'il diminue pour une pente moindre (10°) ou plus forte (30°).*

Si l'érémacausis n'était régie que par la température du sol, le taux de ce sol en acide carbonique libre croîtrait, dans les circonstances précédentes, à mesure que la pente s'accentuerait. Mais comme le taux d'eau a aussi une grande importance et que le dégagement de gaz s'accroît avec lui jusqu'à une certaine limite qui n'est pas atteinte ici, on comprend pourquoi la température élevée des fortes pentes n'a pas sur la production de l'acide car-

1. *Forschungen, etc.*, vol. IX, 1886, p. 166-170.

bonique l'effet qu'elle pourrait avoir ; c'est que l'humidité fait défaut.

Sur un sol plus plat, celle-ci est en quantité suffisante, mais la température est trop basse, si bien que l'effet du premier facteur est paralysé en partie par celui du second. Avec une pente moyenne on est dans les conditions les plus favorables à la décomposition ; — l'humidité n'y est pas en excès comme dans les terrains plats, ni en défaut comme dans les pentes raides ; la température y est moins élevée que dans ces dernières et plus que dans les premières — si bien que, toutes circonstances égales, c'est là que se dégagent les plus fortes quantités d'acide carbonique.

La loi formulée plus haut (voir p. 205), suivant laquelle la décomposition des matières organiques est gouvernée, *cæteris paribus,* par le facteur qui intervient au minimum, se vérifie encore dans les résultats précédents et se vérifierait dans tous les autres cas, étant donnée sa généralité, pour toutes les influences étudiées jusqu'ici.

La *constitution physique du sol* a de l'importance pour les réactions qui s'y passent, puisque c'est d'elle que dépendent surtout la perméabilité, l'humidité et la température.

Tout d'abord, c'est la grosseur des particules du sol qui détermine la quantité d'air qui y est occlus ; elle croît avec le diamètre de ces particules. Ce fait a été nettement démontré sur un sol sablonneux préalablement séparé par des tamis en lots de diverses grosseurs et pourvu de *sa plus petite capacité pour l'eau*[1]. J'ai trouvé[2] les chiffres suivants pour les quantités d'air occluses dans chaque lot.

---

1. Les Allemands distinguent la plus petite capacité pour l'eau ou capacité absolue (*die kleinste Wassercapacität*) et la plus grande capacité (*die grösste* ou *die volle Wassercapacität*). La première est la quantité d'eau qui est retenue par le sol d'une façon durable sans s'écouler dans les profondeurs. La seconde est la quantité d'eau que le sol peut retenir dans le voisinage de la nappe souterraine (*Forstliche Bodenkunde,* par le D[r] RAMANN, p. 65). Voir *Contribution à l'étude de la Chimie agricole,* par Th. SCHLŒSING, Paris, Dunod, 1888, p. 89-95. (Trad.)

2. *Forschungen, etc.,* vol. VIII, 1885, p. 367-373.

1 000 volumes du sol renfermaient en volumes d'air :

GROSSEUR DES GRAINS, EN MILLIMÈTRES.						
0,01-0,071.	0,071-0,114.	0,114-0,171.	0,171-0,25.	0,25-0,50.	0,50-1,00.	1,00-2,00.
—	—	—	—	—	—	—
104.4	122.7	372.1	364.1	359.7	347.8	344.0

L'argile, qui est encore plus fine que le sable de l'essai précédent, ne renfermait dans les mêmes conditions de saturation que 81.6 volumes d'air pour 1 000 volumes de sol et l'humus 293.7.

Ces différences se modifient au détriment des éléments fins à mesure que le taux d'eau augmente ; avec un taux élevé, les matières à grains fins ne contiennent que des quantités minimes d'air. Cela est vrai aussi bien du sable très fin que de l'argile et de l'humus, où les pores sont extrêmement rapetissés par l'augmentation sous l'action de l'eau des éléments colloïdaux que renferment ces divers sols.

Comme l'air est rarement stagnant dans le sol, qu'il y est d'ordinaire constamment en mouvement par suite de la pression atmosphérique, des variations de température et de l'action des vents, donc incessamment renouvelé, la capacité du sol pour l'air a moins d'importance vis-à-vis des réactions que sa *perméabilité pour l'air*, c'est-à-dire son aptitude à le laisser circuler. Pour acquérir sur ce point des notions exactes, j'ai ajouté[1] diverses quantités d'eau aux lots de sable dont il vient d'être question, je les ai placés en couche de 50 centimètres dans des tubes de 5 centimètres de diamètre et j'y ai fait passer de l'air sous une pression de 50 millimètres d'eau. Les quantités d'air (en litres) qui ont passé par heure sont inscrites ci-après :

EAU ajoutée.[2]	GROSSEUR DES GRAINS, EN MILLIMÈTRES.						
	0,01-0,071.	0,071-0,114.	0,114-0,171.	0,171-0,25.	0,25-0,50.	0,50-1,00.	1-2.
—	—	—	—	—	—	—	—
(vol. cubes.							
80.	1,02	7,00	16,30	26,16	54,90	61,44	79,55
160.	0,69	1,08	4,48	8,83	27,00	29,82	48,00
240.	0.24	0,27	3,16	4,32	12,00	25,05	43,00

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVI. 1893, p. 193-222.

2. Le volume du sol était de 981^{cc},5.

Il ressort clairement de ces chiffres que *la perméabilité du sol pour l'air décroît à mesure qu'augmente le taux d'eau et décroît d'autant plus que le sol est à grain plus fin.*

Dans les sols tels que les sols argileux ou humiques qui contiennent une assez grande quantité de matières colloïdales, aux modifications provenant du taux d'humidité viennent encore s'ajouter celles qui tiennent à leur changement de volume sous l'influence de l'eau.

Par l'humectation les éléments colloïdaux gonflent; cette augmentation de volume a pour conséquence de réduire celui des pores de façon que l'air circulant dans le sol s'y meut plus difficilement qu'auparavant. Un éclatant exemple de ce fait m'a été fourni par une sorte de tourbe (d'Oldenbourg) qui, déjà avec un taux d'eau de 33 p. 100 en volume, était complètement impénétrable à l'air, tandis qu'elle a pu absorber de l'eau jusqu'à complète saturation de 60-70 p. 100 en volume. Les sols argileux se comporteront de même [1], on peut en être certain, et on devra conclure que *tous les sols riches en substances colloïdales (humiques, argileux, ferrugineux, etc.) deviennent, à l'état naturel, imperméables pour l'air déjà avec un taux d'eau qui est plus ou moins au-dessous du point de saturation.*

Il est bon de remarquer que, grâce à l'humectation par l'eau atmosphérique des couches superficielles du sol, l'accès de l'air s'y trouve diminué et entravé d'autant plus que ces couches sont plus saturées et demeurent plus longtemps à cet état, c'est-à-dire d'autant plus que le sol est à grain plus fin et contient plus d'éléments humiques et argileux.

Le taux d'eau du sol est, comme celui de l'air, très différent suivant sa constitution physique, toutes circonstances égales d'ailleurs, c'est-à-dire pour une égale addition d'eau.

En laissant de côté les détails, il résulte des recherches faites jusqu'à présent que *l'humidité contenue dans le sol augmente avec la*

---

1. Pour ces sols il n'est pas possible de démontrer le fait par l'expérience, parce qu'avec une faible humectation ils se mettent en grumeaux et qu'avec une plus forte ils donnent une bouillie.

finesse du grain et le taux du sol en principes colloïdaux. Ceci ressort nettement des chiffres suivants que j'ai obtenus entre autres [1] :

Taux d'eau du sol jusqu'à 30 centimètres de profondeur exprimé en pour-cent du volume.

(Moyennes de 27 dosages faits pendant le semestre d'été.)

Sable quartzeux.

	GROSSEUR DES GRAINS EN MILLIMÈTRES.					
	0-0,25	0,25-0,50	0,50-1,0	1,0-2,0	2,0-4,5	4,5-6,75
	—	—	—	—	—	—
1892. .	24.23	18.04	15.29	9.00	7.84	6.06
1893. .	15.21	12.95	11.54	7.50	7.20	5.31

Du lehm renfermait dans les mêmes conditions 38.81 d'eau, soit 32.66 p. 100 en volume. De faits tels que ceux qui précèdent on doit conclure que, parmi les diverses espèces de sols, le sable accusera un moindre taux d'eau que l'argile et l'humus. C'est ce que montrent les chiffres ci-dessous provenant de mes expériences [2] :

Taux d'eau du sol jusqu'à 30 centimètres de profondeur exprimé en pour-cent du volume.

(Moyennes de 9 dosages pendant le semestre d'été.)

	TOURBE.	SABLE CALCAIRE riche en humus.	LEHM.	SABLE calcaire à grain fin.	SABLE quartzeux.
	—	—	—	—	—
1879 .	40.99	36.79	28.31	25.74	10.39

Ces différences proviennent de ce que le nombre des interstices où s'exerce l'action capillaire ainsi que la surface mouillée par l'eau augmentent avec la finesse du grain et que les substances colloïdales s'imbibent d'eau, contribuant ainsi, comme nous l'avons vu, à un rapetissement des pores et, en même temps, à un accroissement de la capillarité.

Les résistances qui s'opposent au passage de l'eau à travers le sol sont proportionnelles à la grosseur des interstices. *Les eaux d'infiltration qui s'écoulent à une profondeur déterminée sont d'autant*

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 386 et 387.
2. *Forschungen, etc.*, vol. V, 1882, p. 17.

moins abondantes que le sol est à grains plus fins. Cela est évident d'après les chiffres suivants empruntés à quelques-unes de mes expériences[1] :

Quantités d'eau d'infiltration à 30 centimètres de profondeur par 400 centimètres carrés de surface, en grammes.

(Moyennes de 27 observations pendant le semestre d'été).

Sable quartzeux.

	QUANTITÉ de pluie. gr.	GROSSEUR DES GRAINS EN MILLIMÈTRES. 0,0-0,25	0,25-0,50	0,50-1,0	1-2	2-4,5	4,5-6,75
	—	—	—	—	—	—	—
1892.	27 338	8 836	15 091	18 880	20 641	21 876	22 138
1893.	20 286	4 330	10 584	12 790	13 557	15 398	15 749

L'argile et l'humus sont complètement impénétrables à l'eau quand ils sont saturés[2]. Remarquons aussi que *la perméabilité d'un sol pour l'eau dépend exclusivement de la couche qui renferme les éléments les plus fins.* Ainsi s'explique qu'un sol, d'ailleurs perméable, ne fournisse aucune eau d'infiltration s'il repose sur un sous-sol imperméable (roche massive, argile, sable très fin, calcaire, etc.). Dans ces conditions, l'eau qui a traversé les couches supérieures se rassemble à la surface de la zone impénétrable en constituant ce qu'on appelle la nappe souterraine (*Grundwasser*).

Celle-ci s'élève plus ou moins suivant les circonstances et remplit d'eau complètement ou en partie les couches du sol qu'elle baigne.

En ce qui concerne la température du sol dans ses relations avec sa composition physique, cette température résulte de la combinaison des influences d'une série de facteurs qui réagissent l'un sur l'autre d'une manière si compliquée qu'on ne peut se faire une idée juste des particularités des divers sols à l'aide des moyennes d'observations embrassant une assez longue période, et ce sont seulement les différences relatives avec la température extérieure dans chaque période qui offrent un point d'appui. Ceci se déduit de ce que nous venons de dire, que les divers sols, malgré leur manière d'être sensiblement différente vis-à-vis des variations de température,

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 389 et 390.
2. *Forschungen, etc.*, vol. XIV, 1891, p. 14.

n'accusent généralement dans la moyenne annuelle que des écarts minimes, comme le montrent par exemple les résultats suivants obtenus par E. Ebermayer[1] :

Température moyenne annuelle du sol à Münich.

(Moyenne de quatre années.)

A UNE PROFONDEUR DE	SABLE quartzeux.	SABLE calcaire.	LEHM.	SOL tourbeux.
15 centimètres . . .	9° 27	8° 63	8° 55	8° 92
30 — . . .	9 21	9 10	8 74	9 17
60 — . . .	9 39	9 14	9 11	10 16
90 — . . .	9 42	9 23	9 16	10 03

Les caractères thermiques du sol s'apprécient bien plus nettement en suivant la marche de la température dans un même sol.

Les règles qu'on peut poser à ce sujet se résument à peu près ainsi : Quand la température s'élève (pendant l'insolation et la saison chaude comme pendant une journée), de tous les éléments des sols c'est le quartz qui s'échauffe le plus, puis viennent en série descendante le calcaire, l'argile et enfin l'humus qui éprouve le minimum d'échauffement. Quand la température s'abaisse (pendant la saison froide et pendant la nuit), les rapports caloriques des principaux éléments des sols sont inverses des précédents ; c'est le sable quartzeux qui se refroidit le plus vite et l'humus le plus lentement, l'argile et le calcaire se plaçant entre les deux. Ces assertions se vérifient pour la plupart dans le tableau suivant (p. 221) emprunté à l'ouvrage de E. Ebermayer déjà cité.

Ces chiffres montrent clairement que :

1° *Pendant les saisons froides (automne et hiver), le sol tourbeux (l'humus) est le plus chaud, puis vient le lehm ; le calcaire et le sable sont les plus froids ;*

2° *Au printemps, les rapports de température des éléments principaux des sols s'établissent dans un ordre inverse ;*

3° *En été, le sable est le plus chaud ; après, viennent, rangés par ordre, le sol tourbeux (humus), le calcaire et le lehm.*

---

1. *Forschungen, etc.*, vol. XIV, 1891, p. 195.

Température moyenne mensuelle du sol à Munich (moyenne de quatre années).

MOIS ET SAISONS météorologiques.		SABLE QUARTZEUX à une profondeur de				SABLE CALCAIRE à une profondeur de				LEHM à une profondeur de				SOL TOURBEUX à une profondeur de			
		15 cent.	30 cent.	60 cent.	90 cent.	15 cent.	30 cent.	60 cent.	90 cent.	15 cent.	30 cent.	60 cent.	90 cent.	15 cent.	30 cent.	60 cent.	90 cent.
		degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Hiver.	Décembre	1,24	1,91	2,89	3,91	0,77	2,08	3,05	4,10	1,36	2,01	3,20	4,28	1,68	2,67	4,67	6,05
	Janvier	— 1,25	— 0,10	1,25	2,35	— 1,39	0,48	1,33	2,43	— 0,75	0,00	1,57	2,73	0,24	1,28	2,36	4,24
	Février	0,19	0,24	0,96	1,69	— 0,41	0,45	0,82	1,60	— 0,28	0,12	0,90	1,76	— 0,33	0,39	1,82	3,35
		0,06	0,69	1,70	2,65	— 0,34	1,00	1,73	2,71	0,11	0,71	1,89	2,92	0,51	1,45	2,95	4,55
Printemps.	Mars	3,87	3,65	3,58	3,65	3,06	3,09	3,07	3,20	2,74	2,71	3,00	3,13	0,93	1,11	1,93	2,73
	Avril	8,44	7,85	7,11	7,02	7,71	7,23	6,87	6,41	7,03	6,81	6,89	6,42	6,08	5,57	5,48	4,81
	Mai	15,41	14,48	12,94	11,49	15,05	15,14	12,20	11,12	13,77	14,71	11,99	10,69	13,21	12,70	10,63	9,06
		9,24	8,66	7,87	7,39	8,60	8,49	7,38	6,92	7,85	7,90	7,29	6,75	6,74	6,47	6,03	5,53
Été.	Juin	17,48	16,35	15,82	15,13	16,69	16,53	15,40	14,47	16,17	15,59	15,06	14,07	16,67	16,57	16,32	13,83
	Juillet	21,07	20,17	19,32	18,13	20,58	19,67	18,99	17,73	19,59	18,98	18,40	17,18	20,93	20,40	19,65	17,19
	Août	19,27	18,63	18,21	17,02	18,21	18,18	17,78	17,21	17,83	17,56	17,53	16,81	19,32	19,64	20,03	18,60
		19,27	18,38	17,78	16,76	18,49	18,13	17,39	16,47	17,86	17,37	16,99	16,02	18,97	18,87	18,67	16,54
Automne.	Septembre	11,69	14,77	15,23	15,33	13,55	14,11	14,77	11,98	11,56	11,38	14,90	11,73	15,46	16,76	17,85	17,26
	Octobre	7,91	8,48	9,80	10,79	7,35	8,60	9,88	10,87	7,71	8,46	10,15	11,08	9,22	10,38	13,13	13,91
	Novembre	3,12	3,89	5,30	6,50	2,43	4,02	5,40	6,61	3,33	3,97	5,75	7,01	3,82	5,19	8,03	9,45
		8,57	9,74	10,11	10,87	7,70	8,92	10,02	10 49	8,51	8,93	10,27	11,21	9,50	10,78	13,01	13,51

Si, au point de vue de l'activité de la décomposition, on ne considère que la saison chaude (d'avril à septembre), on doit conclure, d'après les observations précédentes et d'autres encore, qu'en général ce sont les caractères thermiques de l'argile (représentée ici par le lehm) qui sont les plus défavorables, ceux du sable étant les plus favorables, et l'humus (sol tourbeux) ainsi que le calcaire se rangeant sous ce rapport entre les deux premiers. On comprend dès lors pourquoi le praticien qualifie de terres *froides* les sols argileux et de terres *chaudes* les sols sablonneux.

Les différences en question sont la résultante des différences dans la capacité calorifique, la conductibilité et la perte de calorique par l'évaporation. La capacité calorifique du sable est moindre que celle de l'argile, parce que le sable contient moins d'eau. En outre, à cause de ce dernier motif, il y a moins de chaleur perdue pour l'échauffement du sable que pour celui de l'argile; le sable conduit bien mieux la chaleur que l'argile. Ces raisons expliquent que tous les sols sablonneux s'échauffent plus que les argileux.

Mais la plus grande conductibilité du sable jointe à sa moindre capacité calorifique (comparées à celles de l'argile) sont la cause première du plus grand abaissement de température dans le sable que dans l'argile pendant la saison froide.

L'échauffement relativement lent de l'humus pendant les hausses de température tient à cette circonstance que cet élément est celui de tous qui possède la plus faible conductibilité et, à cause de sa grande teneur en eau, la plus forte capacité calorifique, propriétés qui concourent à expliquer que l'humus, comparé à tous les autres éléments principaux des sols, se refroidisse et s'échauffe le plus lentement. Comme, pour le calcaire, les propriétés dont nous venons de parler sont intermédiaires entre celles du sable et celle de l'argile, ses conditions thermiques sont également intermédiaires[1].

Pour un seul et même sol, l'échauffement dépend essentiellement de l'état de sa surface, de la grosseur de ses éléments et de son

---

1. Pour les détails, voir les articles de J. Ahr, *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 397; de R. Ulrich, *ibid.*, vol. XVII, 1894, p. 1; de F. Wagner, *ibid.*, vol. VI, 1883, p. 1; de E. Wollny, *ibid.*, vol. IV, 1881, p. 147.

taux d'eau. A propos de l'influence de la surface, faisons remarquer que la dessiccation de la couche superficielle est corrélative d'une élévation dans la température du sol[1], parce que, dans ces conditions, l'évaporation porte principalement sur la surface. A égalité de composition, la couleur du terrain a sur son aptitude à l'échauffement, et jusqu'à d'assez grandes profondeurs, une influence non négligeable[2]. En saison chaude avec insolation franche, le sol s'échauffe d'autant plus que sa teinte est plus foncée. Les différences de température entre les sols de teinte claire et ceux de teinte foncée s'atténuent plus ou moins dans la saison froide et par une médiocre insolation. Cette influence de la couleur décroît cependant à mesure qu'augmente le taux d'eau[3] et les autres facteurs qui régissent l'échauffement du terrain deviennent prépondérants. Si l'état physique du sol présente d'assez grandes différences, surtout dans le taux d'humus et dans la faculté d'imbibition, l'action de la couleur sur l'échauffement du sol peut être complètement négligée.

Quant à celle de la grosseur des particules, elle se manifeste, d'après les observations précédentes[4], en ce que le sol est pendant l'été d'autant plus chaud, pendant l'hiver d'autant plus froid que les particules sont plus grosses. C'est ce que montrent les chiffres suivants que j'ai obtenus et qui sont les moyennes de 36 observations faites le jour et la nuit :

Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

Sable quartzeux.

DATES.	GROSSEUR DES GRAINS EN MILLIMÈTRES.			
	0,0-0,25	0,25-0,50	0,50-1,0	1,0-2,0
—	—	—	—	—
5-8 juillet . . .	23°,72	24°,65	25°,16	25°,36
5-8 janvier . .	—	— 0 ,62	— 1 ,19	— 1 ,43

Les causes du fait mis en évidence par ces chiffres résident surtout en ce que le taux d'eau diminue et que la conductibilité

1. *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 338-342.
2. *Ibid.*, vol. I, 1878, p. 43-69.
3. *Ibid.*, vol. IV, 1881, p. 327-365.
4. *Ibid.*, vol. V, 1882, p. 179-208.

augmente à mesure que s'accroît le diamètre des particules. Les conditions thermiques du sol dépendent à un haut degré de son taux d'eau[1]. Dans la saison chaude, la température du sol, à composition égale d'ailleurs, est en général d'autant plus basse que sa provision d'eau est plus grande, parce qu'il y a d'autant plus de calorique employé pour la vaporiser à la surface et que la chaleur spécifique se trouve ainsi fort augmentée. Les différences de température sont d'autant plus faibles que l'évaporation l'est aussi et que le sol atteint la meilleure conductibilité correspondant à un taux d'eau assez élevé ; elles sont à leur minimum dans la saison froide, avec une insolation défectueuse, une température aérienne basse, l'absence de vent, une grande humidité dans l'air et un assez fort desséchement de la couche supérieure du sol ; elles sont à leur maximum dans les cas contraires. L'effet du refroidissement par suite d'évaporation est, toutes autres conditions égales, d'autant plus tôt et plus facilement annihilé que le sol contient moins d'eau et que sa faculté d'imbibition est moindre ainsi que son aptitude à remplacer l'eau qui s'évapore à la surface par celle que la capillarité tire des couches profondes.

La mesure de l'influence de l'eau sur la température du sol peut s'apprécier par les chiffres suivants :

Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

	LEHM			SABLE QUARTZEUX		
	mouilleux.	humide.	sec.	mouilleux.	humide.	sec.
5-14 juin	22°,08	23°,47	24°,92	21°,80	22°,59	23°,90
Différence	1°,39		1°,45	0°,79		1°,31
Différence entre le mouilleux et le sec.		2°,84			2°,10	

De la récapitulation de tous ces résultats, il ressort nettement que les propriétés des sols les plus importantes au point de vue de la décomposition des matières organiques s'enchevêtrent dans des relations réciproques infiniment variées et donnent lieu par suite à une série de faits assez compliqués.

1. *Forschungen, etc.*, vol. IV, 1881, p. 147-190.

Tout d'abord, les éléments principaux des sols, d'après ce qui vient d'être dit, diffèrent nettement les uns des autres par leur manière d'être vis-à-vis de l'air, de l'eau et de la chaleur. Le sable, pendant la période principale de décomposition, qui est la saison chaude, est le plus chaud de tous les sols et le plus perméable, mais, par contre, le plus sec. L'argile est caractérisée par sa forte teneur en eau, sa faible perméabilité, sa faible aptitude à l'échauffement. Quant à l'humus, il peut retenir de grandes quantités d'eau, mais, à cause de cela, dans la nature il est d'ordinaire difficilement perméable ; il s'échauffe lentement et n'acquiert des températures assez élevées qu'en été et au début de l'automne [1]. Le calcaire enfin occupe, sous le rapport des propriétés physiques en question, une place intermédiaire entre le sable et l'argile. Cette caractéristique des éléments principaux des sols montre assez que les facteurs agissant dans le sol lui-même sur la décomposition exercent sur ce phénomène des actions tantôt concurrentes, tantôt antagonistes. En s'appuyant sur la loi précédemment énoncée du minimum et du maximum, on détermine facilement quel est celui de ces facteurs qui, pour chaque cas, régit le phénomène.

Dans le sable, la grande perméabilité et la grande aptitude à l'échauffement sont, sans aucun doute, favorables à l'érémacausis. Mais le faible taux d'eau lui est, au contraire, défavorable. L'eau sera donc, pour ce sol, le facteur dont dépendra surtout la décomposition, et comme l'abondance de l'eau dépend des pluies, celles-ci ont une influence considérable sur le phénomène. Dans un climat humide, où le sol est assez souvent humecté, la décomposition de toutes les matières organiques qui s'y trouvent est bien plus intense, même souvent à ce point que, sur le sable, il ne se forme pas, à vrai dire, de dépôt d'humus. Dans ces conditions, le sable mérite à bon droit le nom d'*actif* que le praticien lui donne. Tout autrement se comporte ce sol sous un climat sec, où l'eau atteint son minimum et où, précisément à cause de cette eau trop rare, la grande perméabilité du sol et sa haute température ne peuvent que rarement

1. Ce n'est pas toujours vrai, comme en témoignent plusieurs de mes expériences non encore publiées.

avoir leur plein effet sur l'érémacausis. Dans ce cas, la décomposition marche moins vite, mais plus encore pourtant (sauf dans les cas extrêmes) que dans la plupart des autres sols.

A l'argile ce n'est pas en général l'humidité qui manque, mais la quantité d'air. D'ailleurs, ce sol appartient à la catégorie des terres dites *froides*. La conséquence est que la décomposition sur les sols argileux dépendra surtout de leur perméabilité et, par suite, de leur température ; dans la nature, l'érémacausis y est très lente. En ce sens, un tel sol peut être appelé inerte. Dans un climat humide et avec une couche épaisse d'argile, l'accès de l'air peut être empêché au point que les matières organiques subissent non plus l'érémaucausis, mais la putréfaction.

D'après ce qui précède, la plupart des sables sont caractérisés par de puissantes oxydations qui ne s'attaquent naturellement pas seulement au carbone des matières organiques, mais encore à l'ammoniaque formée dans la décomposition. La nitrification dans de tels sols est ordinairement très énergique. Dans les sols argileux, au contraire, l'oxydation des matières organiques non seulement est restreinte, mais parfois complètement arrêtée, surtout par les pluies abondantes et la texture naturelle du sol. Alors, les processus de désoxydation entrent en jeu, et parmi eux la dénitrification, importante pour l'agriculture.

Le calcaire se rapproche, soit du sable, soit de l'argile, suivant la grosseur des particules, très variable dans cette sorte de sol et réglant l'emmagasinement de l'eau.

L'humus a des propriétés différentes, suivant les doses d'humidité qu'il contient. S'il est accumulé en grandes quantités et saturé d'eau, comme par exemple dans les tourbières, dans les dépôts vaseux des lacs et des fleuves, les matières organiques sont soumises à la putréfaction par suite du manque d'air. Mais s'il est débarrassé de son excès d'eau et, dès lors, perméable à l'air, les phénomènes d'oxydation prennent la place des phénomènes de réduction, et la matière organique se détruit, surtout l'été, assez activement parce que, sans parler d'une bonne aération, il se trouve généralement dans la masse une assez grande humidité et une température favorable. Même les éléments qui ont pris naissance par le mode de la

putréfaction se décomposent par érémacausis, mais lentement, comme on l'a dit plus haut (Voir p. 166).

Les sols naturels sont ordinairement formés par le mélange des principaux éléments dont il vient d'être question ; suivant la prédominance de l'un ou de l'autre, leurs propriétés physiques seront très différentes et, par suite, aussi leur manière d'être vis-à-vis de la décomposition des matières organiques. En s'appuyant sur les indications précédentes, l'examen de la constitution physique du sol permet, sans grandes difficultés, de se faire une idée suffisamment exacte de ce qui se passera dans chaque cas.

Pour apprécier l'influence du degré de finesse des éléments du sol, on utilise la loi maintes fois citée. La quantité d'air et de chaleur augmente avec le diamètre des grains, mais l'humidité décroît si bien que l'eau devient le facteur influent dans les sols à gros éléments. Avec une humectation abondante, la décomposition marche rapidement ; elle deviendra lente dans le même sol par un temps sec ou un climat sec. Dans les terrains à éléments très fins, ce n'est pas en général l'humidité qui manque, mais c'est souvent la dose d'oxygène nécessaire pour une érémacausis active, si bien qu'avec des précipitations atmosphériques assez abondantes les processus de l'érémacausis peuvent céder la place à ceux de la putréfaction. Il résulte de ces observations que, dans la plupart des cas, des sols à éléments de grosseur moyenne et sensiblement égale offrent à cet égard les conditions les plus favorables ; ils ne sont surpassés par les sols à grains très fins que si on apporte à ceux-ci l'oxygène qui leur manque.

L'influence du taux d'eau dans un seul et même sol sur la décomposition des matières organiques a déjà été signalée (Voir p. 177). Le sol gorgé d'eau provoque la putréfaction ; à mesure que l'humidité se rapproche d'un certain taux moyen et que l'air peut arriver plus facilement dans le sol, les processus de l'érémacausis s'accentuent, augmentant d'intensité, puis diminuant au delà de certaines limites avec la diminution progressive du taux d'eau et enfin s'arrêtant quand la masse a atteint le degré dit de sécheresse à l'air.

L'afflux de l'air dans le sol diminue avec la profondeur ; c'est là aussi un fait de la plus haute importance pour la décomposition dans

la nature et dont il résulte que l'érémacausis domine dans les zones superficielles du sol, tandis que dans les couches profondes c'est le mode dit par putréfaction. Suivant l'expression de G. J. Mulder[1], on peut distinguer une zone d'oxydation et une zone de réduction. Ces différences de réactions chimiques entre les couches superficielles et les couches profondes se manifestent aussi pour les sels de fer ; tant qu'ils trouvent des quantités suffisantes d'oxygène dans le milieu, ils se transforment en sesquioxyde ou du moins en fer oxydulé ; en l'absence de l'air, ils donnent du protoxyde et souvent même (tourbières) de la pyrite.

La limite entre les deux zones n'est pas nettement tranchée, d'autant plus que des circonstances extérieures peuvent influer. Mais, en dehors des faits de détail, elle dépend surtout de la composition physique et du taux d'eau du sol. Elle gît beaucoup plus bas dans les sols de texture grossière que dans ceux dont les éléments sont très fins et, dans les cas extrêmes, par exemple dans les sols argileux friches, la zone d'oxydation peut même manquer complètement ; ceci arrive encore dans les cas où le sol est saturé d'eau, soit parce que la couche imperméable est trop près de la surface, soit par infiltration latérale ou par submersion persistante. A mesure que le niveau de l'eau s'abaisse et que l'air peut pénétrer davantage dans le sol, les processus d'oxydation prennent le dessus dans les zones exondées. On le constate aussi par ce fait que les pyrites se transforment en sulfate de protoxyde de fer et celui-ci finalement en oxyde.

Tous ces points ne peuvent être appuyés par des dosages d'acide carbonique faits dans les divers sols parce que les quantités de gaz qu'on en extrairait dépendent non seulement de l'intensité de la décomposition, mais encore de la résistance que les sols opposent à la sortie des gaz. Ainsi, le taux d'acide carbonique libre d'un sol sablonneux peut être inférieur à celui d'un sol de lehm ou d'argile, bien que la matière organique se décompose incomparablement plus vite dans le premier, et cela parce que l'acide carbonique du sol

1. G. J. Mulder, *Die Chemie der Ackerkrume,* édition allemande, par J. Muller, Berlin, 1862, p. 28 et 34.

sablonneux se diffuse bien plus aisément dans l'air que celui du sol argileux.

Tout comme la composition physique du sol, sa *composition chimique* importe aussi dans la question qui nous occupe. On peut le prévoir déjà par ce que nous avons dit à propos de l'influence des agents chimiques sur l'érémacausis. Nous y renvoyons le lecteur ; rappelons seulement ici que dans la nature c'est à la chaux qu'est dévolu le rôle principal ; comme on l'a montré, elle active beaucoup, sous forme de carbonate, l'humification des matières organiques et, sous forme de sulfate, la nitrification. Les humus acides qui se forment en l'absence de l'air, par la putréfaction des substances organiques, entravent au contraire ces réactions. Il en est de même quand de notables quantités de sels s'accumulent dans le sol, par exemple dans les régions arides (*salants*), ou quand certains sels, tels que le chlorure de sodium, possèdent des propriétés antiseptiques bien accusées.

3. — Formes de la végétation et couvertures mortes.

Quand le sol est couvert de plantes vivantes ou de matières inertes (couverture des forêts, paille, fumier, etc.), sa température et son humidité sont modifiées d'une manière si tranchée, surtout pendant l'été, qu'une part prépondérante dans les processus de décomposition revient de droit à la couverture du sol. Pour le comprendre, il faut d'abord se faire une idée des influences qui entrent en jeu ; c'est à quoi va tendre ce qui suit.

E. Ebermayer [1] et moi [2] avons cherché à déterminer dans ses détails l'influence de la couverture sur la *température du sol*.

Les chiffres suivants que j'ai obtenus peuvent servir à la préciser [3].

---

1. E. Ebermayer, *Die physikalischen Einwirkungen des Waldes auf Luft und Boden*. Berlin, 1873. — *Forschungen, etc.*, vol. XIV, 1891, p. 379-399.

2. E. Wollny, *Der Einfluss der Pflanzendecke und Beschattung auf die physikalischen Eigenschaften und die Fruchtbarkeit des Bodens*. Berlin. 1877. — *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 198-256 ; vol. X, 1887, p. 261-344 ; vol. XII, 1889, p. 1-75 ; vol. X, 1887, p. 415-446 ; vol. XIII, 1890, p. 134-184 ; vol. XVII, 1894, p. 153-202.

3. *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 220.

MOIS.	TEMPÉRATURE DU SOL.											
	GAZON. — A la profondeur				COUCHE DE FUMIER DE 1cm,5 D'ÉPAISSEUR. — A la profondeur				SOL NU — A la profondeur			
	de 10 centimètres.	de 40 centimètres.	de 70 centimètres.	de 100 centimètres.	de 10 centimètres.	de 40 centimètres.	de 70 centimètres.	de 100 centimètres.	de 10 centimètres	de 40 centimètres.	de 70 centimètres.	de 100 centimètres.
	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Mai 1875.	16,74	15,09	13,40	11,62	16,16	14,89	12,94	11,22	17,00	15,32	13,60	11,53
Juin.	18,27	17,84	16,97	15,52	18,71	18,00	16,90	15,38	19,98	18,71	17,34	15,79
Juillet.	17,69	17,85	17,42	16,53	19,05	18,39	17,52	16,56	19,60	18,48	17,71	16,90
Août	18,79	18,92	18,39	17,44	19,90	19,44	18,44	17,49	21,21	19,81	18,89	17,98
Septembre	14,72	15,97	16,34	16,31	15,18	15,72	16,24	16,12	15,54	15,98	16,37	16,35
Octobre	7,79	9,65	10,89	11,74	8,09	9,66	10,86	11,43	6,80	9,01	10,56	11,39
Novembre	3,76	4,95	6,06	7,07	3,81	4,85	6,03	6,93	2,43	4,40	5,85	6,71
Décembre.	— 0,48	1,19	2,45	3,55	— 0,02	1,12	2,46	3,48	— 2,06	0,27	2,01	3,08
Janvier 1876	— 2,83	— 0,45	0,89	1,81	— 1,68	0,02	0,89	1,85	— 3,47	— 1,28	0,60	1,49
Février.	— 1,79	— 1,10	— 0,13	0,63	— 1,56	— 0,96	0,06	0,72	— 1,01	— 1,46	— 0,29	0,39
Mars	2,98	1,04	0,72	1,33	1,68	0,54	0,44	1,16	3,95	1,09	0,46	0,98

Quant à l'échauffement du sol sous les arbres forestiers, mes observations, relatées ci-dessous, faites dans des conditions absolument identiques, fournissent des renseignements assez précis[1] :

Température du sol à 25 centimètres de profondeur.

DATE.	ÉPICÉAS sans couverture.	ÉPICÉAS avec couverture.	BOULEAUX sans couverture.	GAZON.	SOL NU.
—	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Avril 1887	5,71	5,11	7,15	6,44	7,06
Mai	9,82	9,83	10,73	11,44	11,22
Juin	15,14	14,69	17,02	16,74	18,22
Juillet	18,70	18,32	20,58	20,94	22,05
Août	17,13	16,91	18,64	18,62	19,39
Septembre	14,75	14,51	15,97	15,49	16,36
Moyenne	**13,57**	**13,26**	**15,04**	**14,98**	**15,75**

Le tableau ci-dessous montre quels changements les diverses couvertures ont amenés dans la température du sol d'après mes expériences[2] :

Température du sol à 12 centimètres de profondeur, sous une couverture de 2cm,5 d'épaisseur.

MOIS.	AIGUILLES de pin.	AIGUILLES d'épicéa.	FEUILLES de chêne.	FEUILLES de hêtre.	MOUSSE.	SOL NU.
—	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Mai	13,38	13,16	13,15	13,17	13,25	15,11
Juin	17,34	17,20	17,05	17,03	17,28	18,35
Juillet	16,27	16,38	15,70	15,68	16,17	16,57
Août	17,06	17,04	16,54	16,55	16,89	17,84
Septembre . .	14,45	14,50	14,25	14,24	14,28	14,59
Octobre . . .	7,30	7,39	7,24	7,20	7,28	7,21
Moyenne. .	**14,30**	**14,28**	**13,99**	**13,98**	**14,19**	**14,94**

En examinant ces chiffres, on arrive à cette conclusion :

1° Le sol couvert de plantes vivantes ou de parties végétales mortes (couverture, fumier, paille, etc.) est jusqu'à une assez grande pro-

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 154-171.
2. *Ibid.*, vol. XIII, 1890, p. 163.

fondeur sensiblement plus froid en été et plus chaud en hiver que le sol nu ;

2° Les différences sont surtout accusées en été.

Les influences en question se manifestent à un bien plus haut degré dans la marche journalière de la température que dans les températures moyennes correspondant à des périodes assez longues, comme celles que nous venons de considérer. Cette assertion ressort avec évidence de l'exemple suivant[1] :

Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

		GAZON.	COUCHE de fumier de 1 centimètre d'épaisseur.	SOL NU.
8 juin 1876.	Minuit	19,0	19,2	18,9
	2 heures	18,6	18,7	18,0
	4 —	18,3	18,2	17,3
	6 —	**18,0**	**18,0**	**16,8**
	8 —	18,0	17,9	17,2
	10 —	18,6	18,8	19,5
	Midi	19,5	20,2	23,2
	2 heures	20,7	21,7	26,8
	4 —	21,3	22,9	28,5
	6 —	**21,3**	**23,2**	**28,5**
	8 —	20,9	22,8	26,7
	10 —	20,4	22,0	23,4
	Moyenne	**19,53**	**20,26**	**22,03**

Les différences de température entre le sol couvert et le sol nu sont, au moment du maximum journalier, plus grandes que dans les moyennes mensuelles. Pendant la nuit le sol nu, surtout à l'heure du minimum journalier, est généralement, sinon toujours, plus froid que le sol couvert. L'échauffement du sol, sous l'influence des diverses espèces de sols, se fait dans les couches superficielles pendant le jour comme il se fait dans l'été pour les moyennes mensuelles, et pendant la nuit il suit une courbe analogue à celle des moyennes mensuelles hivernales. L'excès de température diurne du sol nu sur le sol couvert est si prononcé que le refroidissement nocturne rela-

1. E. Wollny, *Der Einfluss der Pflanzendecke, etc.*, p. 44.

tivement plus accentué du premier ne se fait pas sentir sur la température moyenne qui, on le voit, est plus élevée que celle du sol couvert.

Du reste, l'effet que la couverture exerce sur la température du sol est très différent suivant le temps, suivant la composition du sol et des objets qui le recouvrent. Si, pendant l'été, il survient une importante dépression dans la température, les couches superficielles du sol nu deviennent au contraire plus froides que celles du sol garni de plantes. Inversement, si, après une période de froid, la température s'élève, le sol friche s'échauffe plus vite que le sol couvert de plantes vivantes ou de détritus végétaux. Plus est grand le nombre des jours clairs et ensoleillés, plus s'accusent les différences de température entre le sol nu et le sol couvert; elles diminuent dans la mesure où s'accroît la nébulosité et où décroît la température de l'air. Il résulte de tout ceci que l'influence de la couverture du sol sur sa température est d'autant plus sensible que les agents extérieurs de l'échauffement du sol se montrent plus favorables et *vice versa*.

N'oublions pas de mentionner que les influences de la couverture sur l'échauffement du sol, telles qu'elles sont indiquées plus haut, se font sentir à des degrés divers sur des terrains de composition physique différente. Sur ceux d'origine minérale, comme les sols sablonneux qui conduisent relativement bien la chaleur, les changements de température provoqués par la couverture sont sensiblement plus rapides que sur les sols de nature organique (tourbe) à conductibilité faible, si bien que, dans le premier cas, le sol nu s'échauffe beaucoup plus vite que celui qui est couvert quand la température s'élève et que, dans le second cas, il se refroidit plus vite quand la température décroît[1]. Enfin, la composition de la couverture, toutes autres circonstances égales, a de l'importance pour la température du sol.

Si elle est formée de plantes à vie courte, les différences de température entre les sols couverts et les sols nus sont minimes, tant que les plantes sont à l'état jeune et que l'insolation est faible (prin-

1. *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 199-218.

temps); elles s'accentuent à mesure que la végétation progresse et que la température s'accroît; elles atteignent d'ordinaire leur maximum en été pour diminuer à l'automne dans la mesure où s'atténuent l'ombrage et l'insolation.

Les arbres forestiers se comportent de même avec cette différence que, vu la lenteur de leur végétation, leurs influences se prolongent pendant un grand nombre d'années. Si ces arbres se développent assez pour couvrir complètement le sol, celui-ci subit de ce chef pendant l'été le plus fort abaissement de température.

La densité des tiges a une influence assez grande sur la température du sol, ainsi qu'il résulte des chiffres suivants d'une de mes expériences[1] :

Pois. — Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

DATES.	NOMBRE DES TIGES PAR 4 MÈTRES CARRÉS.			
	64.	100.	144.	196.
—	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
26 juin 1878. . . .	18,53	18,14	17,59	17,24
27 —	18,25	17,95	17,38	16,93
28 —	18,61	17,94	17,53	16,94
29 —	23,69	22,97	22,26	21,37
Moyenne. . .	**18,78**	**18,29**	**17,76**	**17,23**

Ces chiffres établissent que *la température du sol en été est d'autant plus basse que les plantes qui le couvrent sont plus denses.* Mes recherches[2] ont aussi montré que *le sol en été s'échauffe d'autant plus faiblement que les organes aériens des plantes sont plus développés.* La moitié d'une parcelle de gazon fut amenée par des engrais appropriés à un développement luxuriant tandis que l'autre moitié restée sans engrais ne montrait qu'une végétation médiocre. Voici les températures du sol à 10 centimètres de profondeur dans les deux moitiés :

	1882				MOYENNE.
	19 juillet.	20 juillet.	21 juillet.	22 juillet.	—
	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Parcelle fumée. . .	19,42	19,83	20,15	20,12	**19,88**
Parcelle non fumée.	20,03	20,82	21,16	20,72	**20,68**

1. *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 243.
2. *Ibid.*, vol. VI, 1883, p. 227-250.

Un autre exemple est fourni par une expérience où l'on cultiva des plants de fèves également espacés provenant les uns de grosses graines, les autres de petites. Les plants développés proportionnellement à la grosseur de la semence eurent sur la température du sol une influence différente qui ressort des chiffres ci-après :

Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

	I. FÈVES provenant de graines.		II. FÈVES provenant de graines.	
	Grosses.	Petites.	Grosses.	Petites.
	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
7 juillet 1881 .	21,90	23,19	21,20	22,42
8 — .	21,10	23,23	21,59	22,57
Moyenne. .	**21,50**	**22,80**	**21,93**	**22,90**

Pour les végétaux forestiers comme pour les agricoles, la température du sol dépend de la densité du peuplement, du développement des organes aériens et du port de la plante ; leur influence est d'autant plus grande qu'ils sont plus serrés et que leurs organes aériens sont plus largement développés[1].

L'action d'une couverture morte dépend surtout de son épaisseur comme le montrent mes essais[2] :

Température du sol à 15 centimètres de profondeur.

MOIS.	SOL NU.	COUVERTURE DE PAILLE de $0^{cm},5$	COUVERTURE DE PAILLE de 2 centimètres.	COUVERTURE DE PAILLE de 5 centimètres.
	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Avril 1884. . .	7,86	7,76	7,64	7,58
Mai	15,08	14,11	13,76	13,31
Juin	14,97	14,58	14,43	14,18
Juillet	20,11	19,42	19,06	18,66
Août	18,92	18,33	18,23	17,82
Septembre. . .	15,44	15,17	15,25	15,17
Moyenne. .	**15,40**	**14,86**	**14,73**	**14,45**

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 168.
2. *Ibid.*, vol. XIII, 1890, p. 163.

Température du sol à 12 centimètres de profondeur.

MOIS.	SOL NU.	COUVERTURE DE MOUSSE de 2cm,5.	de 5 centimètres.	de 7cm,5.	de 10 centimètres.
	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.	degrés.
Mai 1888 . . .	15,11	13,25	12,69	12,50	12,42
Juin.	18,35	17,28	16,86	16,66	16,55
Juillet.	16,57	16,17	16,00	15,90	15,83
Août.	17,84	16,89	16,66	16,56	16,49
Septembre . . .	14,59	14,28	14,34	14,43	14,47
Octobre	7,21	7,28	7,67	8,11	8,24
Moyenne. . .	14,94	14,19	14,04	14,03	14,00

De ces chiffres il ressort que *le sol est d'autant plus froid pendant la saison chaude, d'autant plus chaud pendant la saison froide que la couverture est plus épaisse.*

Tous ces résultats peuvent s'expliquer ainsi. Par la présence des plantes, l'influence directe de l'insolation sur la surface du sol est gênée plus ou moins suivant l'état serré des plantes et le développement de leurs organes aériens, donc suivant l'ombrage. En outre, par l'évaporation extrêmement forte de l'eau à la surface des feuilles il y a beaucoup de chaleur combinée qui est perdue par le sol pendant la saison de végétation, et les plantes consomment de la chaleur pour l'entretien de leurs fonctions (travail interne). Enfin, la mauvaise conductibilité tant de la couche d'air plus ou moins stagnante retenue entre les plantes, que du sol parcouru en tous sens par les racines et pourvu d'une grande quantité de matière organique pourrait être mise en avant pour expliquer le faible échauffement du sol sous l'action d'une température élevée.

En hiver, la température du sol sous l'influence de la couverture présente des rapports inverses de ceux constatés dans la saison de végétation et pour les mêmes raisons. La couverture, mauvaise conductrice, garantit le sol contre un trop grand refroidissement. De plus, avec des plantes pérennes, il se forme à la surface, aux dépens des organes aériens morts, une couverture qui, vu sa faible conductibilité et sa grande chaleur spécifique, diminue l'action de la température de l'air sur le refroidissement du sol.

Cette température extérieure agit immédiatement sur les sols nus qui sont par cela plus froids en hiver que les sols couverts.

Les influences des couvertures mortes sur la température du sol doivent être rapportées à des causes semblables.

L'action exercée à ce point de vue par les diverses formes de la végétation se déduit dès lors d'une manière générale des faits précédents. Si, dans ce qui va suivre, il sera surtout question de la période de végétation, la raison en est que les processus organiques dont le sol est le théâtre sont principalement importants dans cette saison.

De toutes les formes de la végétation, c'est la forêt qui refroidit le plus le sol à cause du couvert exercé par les cimes et de la protection que la couverture morte fournit au sol. La longue période de végétation des arbres, surtout des arbres verts, doit être aussi mise en avant, pour expliquer l'importante dépression de la température dans le sol forestier.

Après les arbres des forêts, ce sont les fourrages pérennes (luzerne, esparcette, trèfle, prairie) qui contribuent le plus à l'abaissement de la température du sol, quoique à un moindre degré que les arbres ; leur influence s'explique par leur très longue durée de végétation et par leur état serré qui ombrage bien le sol. Ce n'est qu'après la fauchaison que cette influence diminue et fait place à un plus fort échauffement, comme il résulte des observations suivantes que j'ai faites[1] :

Température du sol à 10 centimètres de profondeur.

	26 MAI.	27 MAI.	28 MAI.	16 JUIN.	MOYENNE.
	degrés.	degrés.	degrés.	dégrés.	degrés.
Herbe non fauchée. . .	14,21	15,35	15,77	14,60	**15,11**
Herbe fauchée	19,04	20,32	19,22	16,09	**19,53**

A mesure que se développent les organes aériens, l'influence réfrigérante de la couverture vivante augmente à nouveau et atteint son maximum quand le sol est derechef complètement ombragé.

Les végétaux agricoles, cultivés pour leurs grains, leurs racines, leurs tubercules, etc., s'opposent dans une bien moindre mesure à l'échauffement du sol parce qu'à cause de leur état clair, ils ombragent moins le sol, parce qu'aussi leur saison de végétation est géné-

1. *Forschungen, etc.,* vol. VI, 1883, p. 241.

ralement plus courte et qu'après la récolte le sol se trouve plus ou moins longtemps à l'état friche. Les cultures agricoles présentent sous ce rapport les plus grandes différences. Ce sont les grandes légumineuses à feuillage abondant (fèves, vesces, pois), et le maïs fourrage qui dépriment le plus la température, puis viennent les navets, les betteraves et, après, les céréales, tandis que les plantes largement espacées, cultivées pour leurs racines et leurs tubercules, opposent le moindre obstacle à l'insolation.

L'humidité du sol, tout comme sa température, est modifiée par les couvertures. Parmi les nombreuses recherches que j'ai faites à ce sujet[1], je citerai les résultats suivants :

	PROFONDEUR de la couche.	TAUX D'EAU DU SOL		
		sous le gazon.	nu.	sous une couche de fumier de $2^{cm},5$.
15 août 1875.	$0\text{-}10^{cm}$	11,95	20,88	34,43
	10-40	15,19	22,30	29,98
	40-70	15,35	23,95	26,42
	70-100	16,60	24,51	26,28

Les chiffres ci-dessous donnent une idée de l'influence des arbres forestiers sur l'humidité du sol[2] :

Taux d'eau du sol en moyenne jusqu'à $0^m,50$ de profondeur.

ANNÉE.	ÉPICÉAS		BOULEAUX sans couverture.	GAZON.	SOL NU.
	sans couverture.	avec couverture.			
1887	13,25	15,14	12,19	12,96	16,03
1888	14,14	15,30	12,91	13,47	16,36
1889	15,71	16,66	14,96	15,24	17,56
1890	13,98	14,69	14,65	15,44	18,43
1891	14,76	15,04	13,67	14,56	18,13
Moyenne[3] .	**14,37**	**15,37**	**13,66**	**14,49**	**17,29**

1. E. WOLLNY, *Der Einfluss der Pflanzendecke und Beschattung, etc.*, Berlin, 1877, p. 105-135. — *Forschungen, etc.*, vol. X, 1887, p. 261-321 ; vol. XII, 1889, p. 2-31.

2. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 171-180.

3. Ces chiffres sont les moyennes de 117 déterminations faites pendant la saison de végétation.

Ces résultats montrent avec la plus grande netteté que: 1° *le taux d'eau d'un sol garni d'une couverture vivante est, pendant la saison de végétation, toujours plus faible que celui d'un sol nu; 2° un sol recouvert de fumier, de paille et de matières inertes analogues possède, à égalité de composition, un taux d'eau plus fort qu'un sol nu; 3° pendant l'été, le sol couvert de paille ou de fumier est le plus humide, le sol nu l'est moins et le plus sec est celui qui est garni de plantes vivantes.*

Ces conclusions ont été confirmées par les recherches de beaucoup d'autres expérimentateurs[1], si bien qu'on ne peut plus mettre en doute leur exactitude.

Le dessèchement du sol par les plantes tient à leur importante consommation d'eau. Par leurs feuilles qui s'étalent dans l'air sur de vastes surfaces se fait une grande évaporation d'eau provenant d'abord des cellules voisines de la périphérie; celles-ci cherchent à combler leur perte, par imbibition et endosmose, aux dépens des cellules situées plus profondément, et c'est ainsi que se forme dans toute la plante un courant qui va des racines aux organes extérieurs. Donc, il faut que la racine tire du milieu ambiant, le sol, constamment autant d'eau qu'il s'en évapore par les feuilles, pour que les tissus restent turgescents et que les fonctions s'accomplissent sans interruption. C'est le sol qui doit fournir les quantités d'eau nécessitées par la transpiration; c'est le seul milieu par où les précipitations atmosphériques puissent arriver aux plantes. On ne peut admettre, les expériences l'ont montré, que les organes aériens des plantes absorbent l'eau en quantité appréciable, qu'elle soit en gouttelettes ou à l'état de vapeur. *Pour leur consommation d'eau, les plantes sont exclusivement réduites au sol.*

A quel chiffre énorme s'élève cette consommation? c'est ce que l'on peut mesurer par les quantités d'eau nécessaires pour former

1. G. Wilhelm, *Wochenblatt fur Forst- und Landwirthschaft in Würtemberg*, 1866, p. 174; *Land- und forstwirthschaftliche Zeitung*, 1867, p. 31. — J. Breitenlohner, *Allgem. land- und forstwirthschaftliche Zeitung*, 1867, p. 497. — W. Schumacher, *Fühling's landw. Zeitung*, 1872, p. 604-610. — Pour l'influence des arbres forestiers sur l'humidité du sol, voir surtout le travail de E. Ebermayer dans les *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 147-174.

les produits végétaux ou bien encore par l'évaporation de sols plantés comparés à d'autres non plantés.

Les recherches de H. Hellriegel[1] et les miennes faites suivant la première méthode ont montré que, par exemple, chez les diverses plantes agricoles, la production de 1 gramme de substance sèche exigeait de 262 à 402 grammes (233-912 grammes)[2] d'eau. Dans mes expériences sur l'évaporation de sols garnis ou non de végétation, j'ai montré que, du 4 juin au 27 septembre 1881, il s'était évaporé par 1 000 centimètres carrés :

D'un sol de gazon . . .	34 605 grammes d'eau.
D'un sol nu	13 719 —

et que des surfaces égales ayant reçu 57 253 grammes de pluie ont rejeté dans l'atmosphère du 15 avril au 31 octobre 1875 les quantités d'eau suivantes :

	SABLE quartzeux.	LEHM.	TOURBE.
	—	—	—
Gazon	47 355	51 721	55 630
Sol nu	18 312	33 899	30 200

De ces recherches et de beaucoup d'autres du même genre il ressort avec évidence que les sols garnis de plantes en végétation évaporent, toutes conditions égales, de bien plus grandes quantités d'eau que les sols nus. La surface d'évaporation du sol est en quelque sorte multipliée par les plantes un certain nombre de fois. La fourniture directe d'eau provenant du sol même est sensiblement amoindrie par la couverture parce que celle-ci diminue beaucoup l'évaporation du sol ; mais cette influence ne profite pas à la provision d'eau du sol, que les racines des plantes revendiquent énergiquement pour fournir aux organes aériens l'eau nécessaire à la transpiration. Sur le sol nu l'évaporation directe, l'évaporation de la couche superficielle, est, il est vrai, plus grande que sous les plantes ; mais dans ce dernier cas intervient l'important emprunt d'eau fait

1. H. Hellriegel, *Beiträge zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Ackerbaues*. Braunschweig, 1883, p. 622-664.

2. *Der Einfluss der Pflanzendecke und Beschattung*. Berlin, 1877, p. 123-125.

par la végétation. Ajoutons que les précipitations atmosphériques pénètrent intégralement dans le sol nu, tandis que, sur le sol garni de végétation, elles sont retenues en partie par les feuilles ; en outre, au moment des sécheresses, le sol sans végétation se dessèche plus ou moins et cette croûte superficielle desséchée s'oppose à l'évaporation.

Les arbres forestiers se comportent sous ce rapport comme les plantes herbacées. Ainsi j'ai trouvé[1] qu'une surface d'un mètre carré recevant une lame d'eau de 990^l,6 évaporait par an, en litres (moyenne de six années) :

ÉPICÉAS		BOULEAUX	SOL NU.
sans couverture.	avec couverture.	sans couverture.	
—	—	—	—
860,8	877,7	754,0	482,0

L'action exercée par les *couvertures mortes* (paille, fumier, couverture, etc.) tient tout d'abord à ce que la surface d'évaporation du sol, en contact avec l'atmosphère, est diminuée par l'adjonction de ces matériaux et à ce que l'influence des agents d'évaporation est entravée. Dans ces conditions le vent et l'insolation ne peuvent plus faire sentir directement sur le sol leur action desséchante. En outre, l'abaissement de la température du sol sous l'influence des couvertures mortes intervient dans l'explication du phénomène, comme aussi la circonstance que les matières organiques enferment une couche d'air saturée de vapeur d'eau qui est un obstacle à l'évaporation du sol. Mes résultats relatés ci-après montrent le degré de cette influence[2] :

Quantité d'eau évaporée (en grammes) par 1 063 centimètres carrés de surface.

(Du 27 juillet au 5 août 1875.)

	SABLE.	LEHM.	TOURBE.
	—	—	—
Sol nu	**3 783**	**3 339**	**3 820**
Sol couvert d'une couche de 1^{cm},5 . . .	**1 265**	**1 423**	**1 915**

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 202.
2. *Ibid.*, vol. X, 1887, p. 297, et vol. XIII, 1890, p. 175.

Quantité d'eau évaporée (en grammes) par 1 000 centimètres carrés de surface.

	SABLE CALCAIRE RICHE EN HUMUS avec une couverture de 2cm,5					
	de mousse.	d'aiguilles d'épicéa.	d'aiguilles de pin.	de feuilles de chêne.	de feuilles de hêtre.	sol nu.
	—	—	—	—	—	—
Du 11 au 19 juin et du 20 au 30 août 1888	470	360	480	270	270	2 030
Du 12 au 20 juillet et du 1er au 13 août 1889	730	630	680	440	370	2 020

Le sol muni d'une couverture a donc évaporé beaucoup moins d'eau que le sol nu.

L'humidité du sol, comme sa température, est diversement influencée par la *composition des couvertures*. L'état plus ou moins serré des tiges est d'abord de grande importance, comme il résulte des observations suivantes faites par moi[1] :

Taux d'eau du sol jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

Pois, 13 juin 1875 :			
Nombre de tiges par 4 mètres carrés.	64	100	144
Humidité du sol	**20,11**	**14,71**	**11,93**
Betteraves, 4 août 1875 :			
Nombre de tiges par 4 mètres carrés.	16	36	49
Humidité du sol	**23,14**	**17,53**	**15,66**
Pommes de terre, 16 juillet 1876 :			
Nombre de tiges par 4 mètres carrés.	16	36	64
Humidité du sol	**18,04**	**17,01**	**16,58**

Ces chiffres montrent que *le sol s'épuise d'autant plus en eau que les plantes sont plus serrées.*

Au reste, *la consommation d'eau par les plantes est, toutes choses égales, d'autant plus forte que les plantes sont plus développées.*

1. *Forschungen, etc.,* vol. X. 1887, p. 298.

Cela résulte non seulement de mes expériences[1], mais aussi de celles de H. GILBERT[2] dont voici quelques résultats :

	PRAIRIE		
	non fumée.	Fumure de sels ammoniacaux.	Fumure de nitrates.
	—	—	—
Récolte de foin en 1870 par acre en cwt[3].	5 3/4	29 1/2	56 1/4

Taux d'eau du sol à diverses profondeurs (25 et 26 juillet 1870).

De 0 à 22 centimètres . .	10,83	13,00	12,16
De 22 à 44 — . .	13,34	10,18	11,80
De 44 à 66 — . .	19,23	16,46	15,65
De 66 à 88 — . .	22,71	18,96	16,30
De 88 à 110 — . .	24,28	20,54	17,18
De 110 à 132 — . .	25,07	21,34	18,06
Moyenne.	**19,14**	**16,75**	**15,19**

En ce qui concerne la dessiccation du sol aux diverses phases de l'accroissement, la moindre réflexion indique que c'est pendant la jeunesse que les végétaux absorbent le moins d'eau, que cette absorption augmente constamment avec leur accroissement et atteint son maximum quand la plante est entièrement développée, après quoi la consommation diminue à mesure que les végétaux approchent de leur maturité. C'est ce que mettent en évidence les résultats de plusieurs de mes expériences[4] et de celles de E. EBERMAYER[5] sur les arbres forestiers. Voici les moyennes des taux d'humidité du sol :

Taux d'eau du sol entre 40 et 80 centimètres de profondeur.

	ÉPICÉA.			SOL
	Jeunes bois 25 ans.	Bois moyens 60 ans.	Bois exploitables. 120 ans.	non boisé.
	—	—	—	—
1884-1885 . . .	16,89	15,28	18,43	20,17
1885-1886 . . .	18,65	17,30	19,71	20,46

1. *Forschungen, etc.*, vol. X, 1887, p. 298-320.

2. *On Rainfall, Evaporation and Percolation. Proceedings of the Institution of civil Engineers London.* 1876, vol. XIV, 3e partie.

3. L'acre vaut $0^{ha},40$, et le quintal anglais (cwt) $50^{kg},8$. (Trad.)

4. *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 28.

5. *Ibid.*, vol. XII, 1889, p. 150 et 152.

Il résulte de ces chiffres que l'humidité du sol est plus ménagée pendant le jeune âge des bois que pendant leur âge moyen, puis qu'avec les progrès de l'accroissement (à l'âge d'exploitabilité) l'extraction d'eau du sol subit une diminution.

Ces résultats confirment, au surplus, ce que nous avons dit plus haut : le sol nu renferme plus d'eau que le sol planté.

L'épaisseur de la couverture morte a bien plus d'importance pour l'humidité du sol que sa composition. Les chiffres suivants empruntés à quelques-uns de mes essais[1] montrent dans quelle mesure cette épaisseur influe sur l'humidité du sol :

Humidité du sol jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

	SOL NU.	COUVERTURE DE PAILLE de 0cm,5	de 2 centim.	de 5 centim.
	—	—	—	—
1883 et 1884[2]. . .	19,88	23,39	25,49	26,18

	SOL NU.	COUVERTURE DE MOUSSE de 2cm,5	de 5 centim.	de 7cm,5	de 10 centim.
	—	—	—	—	—
1888 et 1889[3]. . .	17,51	20,49	20,81	21,22	21,49

On voit qu'un sol muni d'une couverture est sensiblement plus humide pendant la saison chaude qu'un sol nu et d'autant plus que la couverture est plus épaisse. Cette augmentation d'humidité du sol sous l'influence de couvertures d'épaisseur variable n'est cependant pas proportionnelle à cette épaisseur ; les chiffres montrent qu'elle croît dans un moindre rapport.

Si l'on résume l'ensemble des résultats précédents et des observations auxquelles ils donnent lieu, si l'on tient compte aussi d'autres expériences faites par E. Ebermayer et par moi, on peut, au point de vue de l'influence des végétaux agricoles et forestiers sur l'humidité du sol, poser les conclusions suivantes :

Parmi les plantes qui contribuent le plus à dessécher le sol pendant la saison de végétation, il faut compter certainement les fourrages

1. *Forschungen, etc.*, vol. XIII, p. 1890, p. 172 et 173.
2. Moyenne de vingt-neuf dosages.
3. Moyenne de trente-six dosages.

drus, vivaces, à longue période de végétation (trèfle, luzerne, sainfoin, herbes fourragères, etc.). Les prairies ne rentrent pas, en général, dans cette catégorie, parce qu'elles occupent des places plus humides où l'eau leur est fournie par le dessus ou par le dessous. Les légumineuses à feuillage abondant, cultivées pour leurs graines, et quelques plantes commerciales ont de moindres exigences vis-à-vis de l'eau ; à elles se joignent par ordre décroissant les végétaux forestiers.

Les céréales se placent très près de ces derniers en ce sens qu'elles empruntent au sol tout autant ou quelquefois moins d'eau qu'eux.

Les plantes à tubercules ou à racines, cultivées avec large espacement, quelques plantes commerciales qu'on traite de la même manière, sont celles qui ont besoin de la moindre provision d'eau.

Ce que nous venons de dire n'a qu'une valeur générale ; car non seulement il y a dans chacun de ces groupes de grandes différences, mais encore pour la même plante l'influence sur l'humidité du sol dépend des circonstances extérieures.

Ce qui explique l'extraordinaire appel d'eau fait au sol par les fourrages vivaces, c'est, avant tout, ce fait qu'ils sont très drus, qu'ils se trouvent presque toujours en grande transpiration et qu'ils ont une longue saison de végétation.

Les récoltes de graines emploient relativement beaucoup moins d'eau, parce qu'elles couvrent moins longtemps le sol et que, depuis la récolte jusqu'à la culture préparatoire de la récolte suivante, le sol reste nu plus ou moins longtemps. En outre, ces végétaux utilisent moins d'eau au moment de la maturité.

L'épuisement du sol dépend du développement des feuilles ; les légumineuses abondamment feuillées extraient de la terre plus d'eau que les céréales chez lesquelles l'appareil foliacé est bien plus réduit. Dans ces groupes il y a des différences nombreuses.

Ainsi, le besoin en eau des espèces dressées, à vie longue, de la famille des légumineuses (féverole, haricot nain) est plus grand que celui des espèces traînantes à durée de végétation plus courte (pois, vesce) et, parmi les céréales, les espèces, telles que le maïs-graine et le sorgho, qui sont cultivées en rangs espacés tirent moins d'eau du sol que celles qui croissent à l'état serré. De ces dernières, l'avoine et le blé prennent plus d'eau que l'orge et c'est le seigle qui

est le plus frugal. La méthode de cultiver les plantes à tubercules ou à racines à l'état clair entraîne un moindre épuisement de la provision d'eau du sol. Même dans ce groupe de végétaux il se produit des différences: les betteraves absorbent plus d'eau que les pommes de terre et, parmi ces dernières, celles qui ont beaucoup de feuilles en consomment plus que celles qui ont un plus faible développement foliacé.

Pour les arbres forestiers, abstraction faite de la densité du peuplement, l'absorption de l'eau pendant toute l'année est plus grande chez les arbres verts (conifères) que chez les feuillus. Ceux-ci peuvent sans doute épuiser davantage le sol pendant la saison de végétation. Quand il y a une couverture, le taux d'eau du sol est un peu plus élevé que dans le cas contraire; mais les différences d'humidité dans le sol à ces deux états sont faibles, même nulles ou quelquefois en sens contraire parce que l'accroissement des plantes et par suite leur pouvoir de transpiration est accéléré par les principes nutritifs formés dans la couverture lors de la décomposition des matières organiques et rapportés au sol par l'infiltration des eaux atmosphériques.

De ce qui vient d'être dit il ressort suffisamment que les deux facteurs importants pour la décomposition des matières organiques, chaleur et humidité, sont modifiés par les formes de la végétation de la manière la plus variée; il en résulte qu'il est très difficile de prévoir exactement dans chaque cas les rapports des diverses cultures avec les faits en question, d'autant plus qu'aux agents déjà cités il s'en joint deux autres, le travail du sol et sa fumure. Vouloir mesurer[1] l'action de ces divers facteurs par l'acide carbonique de l'air du sol serait un procédé qui conduirait à des notions trop inexactes. On détermine ainsi la quantité de gaz carbonique existant dans le sol[2], qu'il soit fumé ou non, abstraction faite de son état physique qui agit très différemment, suivant les cultures, sur la formation et sur la sortie du gaz.

De plus, selon les plantes que l'on cultive, l'accumulation de la matière organique dans le sol se fait de la façon la plus variée ainsi que sa décomposition. C'est seulement dans le cas où toutes les cir-

1. E. Ebermayer, *Forschungen, etc.*, vol. XIII, 1890, p. 23-49.
2. *Ibid.*, vol. IX, 1886, p. 165-194.

constances sont égales qu'on pourrait obtenir par cette méthode un résultat permettant de juger de l'influence des formes de la végétation sur les processus organiques du sol.

Partant de ce point de vue, il faut, pour évaluer l'action de la couverture sur la décomposition, choisir un dispositif où le sol possède une composition absolument homogène et où la couverture n'ait encore amené aucun changement dans le taux d'humus. J'ai fait des essais dans ces conditions[1]. Des cylindres de tôle de $0^{cm},5$ de hauteur et de $0^{m2},1$ de section, entourés de terre et munis à la base d'un tuyau destiné à l'écoulement de l'eau en excès, furent remplis de 60 kilogr. de sable calcaire riche en humus préalablement mélangé avec soin. La surface dans l'un fut garnie d'une couche de paille de $1^{cm},5$ de hauteur, dans l'autre d'un tapis de gazon et dans le troisième elle resta nue. L'air aspiré d'une profondeur de $0^{m},25$ pendant l'été renfermait les quantités suivantes d'acide carbonique :

	1 000 volumes d'air du sol renfermaient en acide carbonique.			Volume rapporté au volume trouvé sous le gazon pris comme unité.		
	Gazon.	Paille.	Sol nu.	Gazon.	Paille.	Sol nu.
18 mai 1878 . . .	3,735	7,364	6,924	1	2,04	1,84
25 — . . .	1,137	5,172	5,257	1	4,55	4,62
1er juin 1878 . .	1,415	5,734	7,570	1	4,05	5,35
8 — . .	3,809	6,812	7,914	1	1,77	2,07
15 — . .	0,502	7,308	7,450	1	14,56	14,84
22 — . .	1,386	6,346	7,149	1	4,58	5,11
1er juillet 1878 .	0,877	4,542	7,232	1	5,18	8,25
8 — .	2,455	4,910	7,859	1	2,00	3,20
13 — .	1,088	4,716	6,748	1	4,33	6,20
20 — .	2,334	8,461	12,984	1	3,62	5,06
27 — .	2,009	5,527	9,762	1	2,75	4,86
3 août 1878. . .	4,019	3,889	8,470	1	0,96	2,11
10 — . . .	2,068	8,046	11,442	1	3,90	5,52
17 — . . .	1,831	5,632	9,820	1	3,08	5,36
24 — . . .	2,401	14,628	21,760	1	6,09	9.06
31 — . . .	4,009	11,309	11,167	1	2,82	2,78
7 septembre 1879.	3,428	11,233	14,005	1	3,28	4,09
17 — .	0,640	7,250	8,246	1	11,33	12,88
21 — .	0,770	7,001	7,490	1	9,09	9,73
Moyenne . . .	**2,101**	**7,152**	**9,434**	**1**	**3,40**	**4,49**

1. *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 1-14.

Étant donné que le taux d'acide carbonique de l'air occlus dans le sol peut, dans les conditions précédentes, servir à mesurer l'intensité des processus de décomposition, on doit conclure du tableau précédent que **dans le sol garni de végétation l'érémacaucis est bien plus lente que dans le sol garni d'une couverture morte ; c'est dans le sol nu qu'elle est la plus intense.**

Ce sont des différences dans l'échauffement et l'humidité qui produisent ces résultats. Puisque le sol nu, on l'a montré, est plus chaud et plus humide que le sol garni de végétation, l'érémacausis doit être nécessairement plus active dans le premier.

Si le sol muni d'une couche de paille, de fumier, ou de feuilles mortes accuse une plus faible décomposition que le sol nu, malgré un taux d'eau plus élevé, cela doit être avant tout attribué à ce que sa température est moindre.

Si le sol nu avait été ameubli une ou plusieurs fois, comme on le fait en agriculture dans la jachère, et que, par suite, l'influence de l'oxygène eût été favorisée, il eût manifesté une décomposition encore plus active que dans les expériences relatées.

Naturellement, l'influence de la couverture ne se borne pas à l'oxydation du carbone ; elle se fait sentir aussi sur l'oxydation de l'ammoniaque qui se forme par dédoublement des éléments azotés.

Quelques expériences de R. Warington[1] montrent qu'il en est bien ainsi. Après la récolte (1878), il dosa l'azote nitrique de sols qui avaient porté des récoltes agricoles ou qui étaient restés en jachère. Il trouva les chiffres suivants :

Azote nitrique en kilogrammes par acre.

	FUMURE COMPLÈTE		SUPERPHOSPHATE		SANS FUMURE	
	Fèves.	Jachère.	Fèves.	Jachère.	Blé.	Jachère.
De 0 à 22 centimètres.	5,4	13,5	3,3	10,0	1,2	12,8
De 22 à 44 centimètres.	3,8	8,5	1,5	6,3	traces	2,3
	9,2	**22,0**	**4,8**	**16,3**	**1,2**	**15,1**

Bien que ces résultats ne soient pas absolument démonstratifs en

1. *Journ. of the Soc. of Arts*, 1882, t. XXX, p. 532-544.

ce qui concerne l'influence de la garniture végétale sur la nitrification, puisque, pendant leur développement, les végétaux utilisent des nitrates du sol, on peut cependant admettre que les différences accusées par les chiffres précédents ne tiennent pas uniquement à cela ; d'abord, les dosages ont été faits après la récolte, c'est-à-dire à la fin d'une période pendant laquelle les plantes prennent très peu de chose au sol ; ensuite, la parcelle en jachère avait sûrement perdu par dissolution une partie de ses nitrates (voir p. 7 et IIIe partie). Eu égard à ces circonstances, on peut attribuer, sans crainte d'une fausse interprétation, les résultats précédents aux différences dans la température et l'humidité du sol et conclure que **la couverture vivante diminue sensiblement la nitrification dans le sol.**

Ceci n'est vrai que pour la saison chaude ; pendant la saison froide les rapports sont inverses, comme il résulte de quelques essais que j'ai faits [1] suivant le procédé décrit un peu plus haut (voir p. 247).

En hiver et au printemps, l'air du sol renfermait pour 1000 volumes les quantités suivantes d'acide carbonique :

	GAZON.	SOL NU.
	—	—
4 novembre 1878	0,544	0,408
22 mars 1879	1,938	1,213
5 avril 1879	0,872	0,349
19 —	1,382	0,276
Moyenne	**1,184**	**0,561**

Ces différences ne sont pas importantes et les taux d'acide carbonique sont faibles ; ce qui n'a rien de surprenant, puisque les différences de température et d'humidité entre le sol gazonné et le sol nu sont minimes en cette saison et qu'il n'y a pas assez de chaleur pour une décomposition active. Mais, cependant, ces résultats indiquent nettement que les deux facteurs les plus importants pour la décomposition interviennent dans un sens inverse à celui de l'été.

Ce qui vient d'être dit sur les rapports entre la couverture du sol

1. *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 9.

et sa température ou son humidité montre que la mesure dans laquelle sont influencées les réactions dépend de la composition de cette couverture. Puisque les plantes assèchent d'autant plus le sol et le protègent d'autant mieux contre l'insolation qu'elles sont plus drues, on peut déjà conclure *à priori* que, toutes conditions égales d'ailleurs, le taux d'acide carbonique de l'air occlus dans le sol variera suivant cet état de densité. Cette hypothèse est confirmée par les résultats suivants d'une de mes expériences[1].

1000 volumes de l'air du sol contenaient, par $0^{m^2},1$, en acide carbonique, un volume de :

	NOMBRE DE TIGES D'AVOINE.			
	3	6	12	24
20 juillet 1879. . .	3,76	4,92	3,12	2,42
30 — . . .	6,89	2,23	1,18	1,47
9 août 1879 . . .	4,26	3,07	2,62	1,71
Moyenne. . .	**4,96**	**3,44**	**2,31**	**1,87**

Il résulte, en effet, de ces chiffres avec la plus grande netteté que la décomposition des matières organiques dans un sol cultivé est d'autant plus entravée que les plantes ont une végétation plus luxuriante et l'on peut conclure que **la couverture vivante diminue la décomposition des éléments organiques du sol proportionnellement à l'état de densité et de vigueur des plantes qui la composent.**

Les deux agents dominants, chaleur et humidité, ont évidemment une importance différente suivant que le sol est couvert ou non.

Dans un sol assez sec garni de végétation, c'est l'eau qui règle, pas exclusivement mais pour la plus grande part, les processus de décomposition; dans un sol nu avec couverture morte, ceux-ci dépendent surtout de la température. Cette conclusion ressort en partie des résultats de mes expériences, mais tout simplement aussi des faits précédemment exposés sur les relations de la température et de l'humidité avec la décomposition.

---

1. *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 15.

En s'appuyant sur ce qui précède, on pourra déterminer approximativement quelle influence les diverses formes de la végétation et les couvertures plus ou moins épaisses exercent sur les réactions dont nous parlons, si l'on sait quelles modifications elles apportent dans l'échauffement et l'humidité du sol. Malheureusement, ces influences dues aux végétaux à longue vie (arbres forestiers, gazon, fourrages pérennes) ne peuvent se représenter par la détermination du taux de l'air du sol en acide carbonique parce que, nous l'avons déjà dit et l'affirmons encore, avec ces végétaux la quantité de matières organiques dans le sol se modifie avec le temps (voir la IIe partie) et qu'en outre il est difficile de trouver un sol nu, non fumé, maintenu pur de toute végétation pendant des dizaines d'années. A cause de ces difficultés et de l'absence d'analyses comparatives poursuivies pendant un temps suffisant et qui pourraient seules résoudre la question, on doit se borner à préjuger, d'après ce que nous venons d'apprendre, l'influence de la couverture sur la température et l'humidité du sol en tenant compte de sa perméabilité.

Les formes de la végétation se divisent sous ce rapport en deux catégories. L'influence retardatrice que toutes les couvertures vivantes exercent à un degré variable sur l'érémacausis, si elle n'est pas annihilée dans la plupart des cultures agricoles par le travail du sol et par son maintien à l'état nu entre la récolte et la préparation pour la récolte suivante, est en tout cas très atténuée si on la compare à ce qu'elle est dans les cultures où le sol n'est que très rarement, même jamais travaillé. Sous ce rapport, on peut dire en gros, que, *cæteris paribus,* la décomposition est beaucoup plus intense dans les champs labourés que dans les sols qui ne sont que rarement travaillés (oseraies, sainfoins, luzernières) ou jamais (prairies et forêts). Dans ces deux groupes se prononcent des divergences multiples suivant le couvert et la durée de végétation des plantes considérées.

Parmi les cultures qui favorisent l'érémacausis, il faut citer en première ligne celles où les plantes sont largement espacées et où le sol est ameubli pendant la saison de végétation, telles que les plantes sarclées qui, on l'a vu plus haut, économisent relativement le mieux

la réserve d'eau du sol et permettent le plus fort échauffement de la zone ameublie. Par suite de ces circonstances favorables, la décomposition des matières organiques est à son maximum dans le sol arable et dans les limites déterminées par la couverture vivante ; alors, conformément à ce qui a été dit sur la température et l'humidité, viennent, par ordre décroissant, les céréales, les légumineuses à vie courte et à tiges couchées (pois, vesce), celles à tiges dressées et à vie plus longue (féverole, haricot nain), et ce sont les sols occupés par des plantes vivaces (trèfle, sainfoin, luzerne, gazon) qui accusent la plus grande lenteur dans la décomposition de leurs éléments organiques, non seulement à cause de leur faible taux d'eau et de leur basse température, mais aussi parce qu'ils ne sont soumis à aucune manipulation tant que la récolte n'est pas faite.

Dans les sols de prairie ou de forêt constamment garnis de végétaux vivants, l'érémacausis est bien plus lente que dans les champs qui, au bout d'un certain temps, sont destinés à de nouvelles cultures et par suite ameublis. Dans les sols forestiers, à l'action des arbres vient s'ajouter celle de la couverture qui agit moins par les modifications de l'humidité du sol que par celles de la température. Comme on l'a déjà montré (voir p. 237), cette température s'abaisse encore plus lorsque intervient l'action du couvert exercé par les arbres. Pour ces motifs, *les matières organiques, toutes circonstances égales, se décomposent bien plus lentement dans les sols forestiers que dans les sols agricoles.*

L'influence des *végétaux forestiers* dépend essentiellement de leur âge, de leur consistance et de l'épaisseur de la couverture. Dans le jeune âge, où le couvert est faible ainsi que l'absorption d'eau, les réactions se font encore assez bien ; mais elles vont en diminuant constamment à mesure que les arbres se développent ; elles atteignent leur minimum d'intensité quand le massif est bien plein et que le sol est garni d'une couverture plus ou moins épaisse. Plus tard, les conditions redeviennent plus favorables, parce que les arbres à un âge avancé transpirent moins et tirent donc du sol moins d'eau que dans l'âge moyen (voir p. 243).

La densité du peuplement, qu'elle soit due à la nature ou à des moyens artificiels, a naturellement, tout comme son âge, sur les dé-

compositions qui se passent dans le sol, une influence prononcée. Plus les arbres sont serrés et puissamment développés, plus l'humidité et la température du sol diminuent et par suite aussi l'intensité des réactions. Toutes les mesures tendant à établir un état plus clair du peuplement (éclaircie forte ou faible, ébranchement, etc.) provoquent dans la décomposition une augmentation proportionnelle à l'excédent de chaleur et d'humidité qu'elles amènent dans le sol.

On peut se rendre compte de la mesure dans laquelle la couverture, suivant son épaisseur, influe sur l'érémacausis en se rappelant qu'avec l'accroissement de cette épaisseur s'accroît aussi l'humidité du sol, d'autant que diminue son évaporation directe[1], mais que cette influence est plus ou moins balancée par le meilleur développement des végétaux forestiers dû à cette augmentation de la couverture : aussi faut-il prendre presque exclusivement en considération la diminution qu'elle amène dans la température du sol. Étant données les relations bien connues de ce facteur avec les processus de décomposition, il n'est pas difficile de répondre.

Si les matières organiques contenues *dans* le sol forestier se décomposent lentement, celles qui se trouvent *à sa surface,* dans la couverture, se trouvent dans des conditions bien plus favorables puisqu'elles sont exposées à l'air et peuvent s'oxyder énergiquement. Cependant, les réactions y sont moins intenses que dans les champs à cause du taux d'eau généralement très grand qui diminue d'autant l'aptitude à la décomposition, à cause aussi de la faiblesse de l'échauffement tenant au couvert des arbres.

Suivant le degré de cette dernière influence, l'érémacausis s'exercera avec une activité variable, moindre quand le massif est fermé, plus grande quand il est clair et cela tant qu'il y aura dans la masse une humidité suffisante ; elle n'aura lieu que dans une faible mesure si, par suite de circonstances particulières de température, la couverture perd par évaporation de grandes quantités d'eau.

C'est dans le sol des prairies que la décomposition va le plus lentement parce qu'en raison de la présence en masse des racines du

---

1. *Forschungen, etc.,* vol. X, 1887, p. 428-446.

gazon dans les couches superficielles, en raison de l'affluence de l'eau dans les couches profondes, l'accès de l'air est très limité et la température du sol est basse. Aussi, les réactions y sont moins actives que dans le sol forestier plus sec où les racines s'enfoncent plus profondément et ne sont pas si accumulées dans la zone superficielle ; généralement même la décomposition s'y fait suivant un mode qui doit rentrer dans la putréfaction.

Dans les sols marécageux, tels que les tourbières constamment gorgées d'eau jusqu'à la surface, c'est la putréfaction seule qui intervient à cause de l'absence complète d'air. L'influence des diverses formes de la végétation sur la nitrification doit être discutée à part, puisqu'elle amène quelques particularités dans ce processus. Le sol agricole, fréquemment travaillé, nitrifie toujours et d'autant plus énergiquement que les plantes absorbent moins d'eau et abaissent moins la température. C'est bien certainement dans le sol garni de fourrages vivaces que la nitrification est la plus faible ; elle peut même être complètement interrompue, si le sol laissé en friche assez longtemps n'a qu'une faible perméabilité, et se trouver remplacée par la dénitrification.

Les conditions nécessaires à la nitrification ne se rencontrent généralement pas dans les sols de forêts, de prairies et de tourbières, puisqu'ils ne possèdent pas d'organismes nitrifiants, comme nous l'avons montré plus haut. Leur alimentation azotée doit donc être autre que celle des plantes agricoles qui utilisent principalement les nitrates du sol.

Les cultures des graminées dans des solutions nutritives ne contenant, avec les autres sels minéraux, que de l'ammoniaque ont montré que ces plantes pouvaient absorber l'azote sous cette forme ; elles se développent aussi bien que si l'azote leur est donné en nitrate [1]. Il peut en être de même pour les arbres forestiers, comme le fait pressentir ce fait qu'on trouve dans leur sève de certaines quantités de sels ammoniacaux [2]. Outre l'alimentation par les sels ammoniacaux, il y a aussi à envisager pour les plantes en question la possibilité de

1. E. Bréal, *Annales agronomiques*, t. XIX, 1893, p. 274-293.

2. E. Ebermayer, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, août 1888.

se nourrir à l'aide des éléments organiques azotés du sol. Il est vrai qu'on a jusqu'alors admis que les plantes supérieures vertes étaient réduites, pour satisfaire leurs exigences en carbone et en azote, à l'acide carbonique de l'air, aux nitrates et aux sels ammoniacaux et qu'elles étaient incapables d'utiliser dans ce but les matières organiques; mais diverses observations récentes rendent très vraisemblable l'utilisation de ces matières pour la construction de leurs tissus, utilisation qui peut être directe (graminées)[1], ou indirecte par le concours des *mycorhizes* (arbres forestiers)[2], revêtement de mycélium entourant les radicelles (IIe partie). Pour l'alimentation azotée des graminées et des arbres forestiers, les combinaisons amidées, qui se trouvent en assez grande quantité dans les sols de prairies ou de forêts, semblent jouer un grand rôle; d'après les observations de A. BAUMANN[3], l'ammoniaque qui se dégage de ces sols sous l'action d'une lessive de soude peut dépasser de 10 à 20 fois le taux réel d'ammoniaque du sol. (Voir *Note D :* Sur l'absorption des matières hydrocarbonées et azotées par les plantes.)

4. — Eau.

Bien que dernièrement, pour décider si l'on pouvait jeter les matières fécales dans les cours d'eau, on ait fait de nombreuses observations sur ce que deviennent les matières organiques dans l'eau, on n'est pourtant pas encore arrivé à des résultats qui puissent être généralisés, et cela parce que d'abord on n'a pas soumis la question à une recherche systématique tenant suffisamment compte de toutes les circonstances accessoires, et qu'ensuite on a souvent, en vertu d'idées préconçues, laissé de côté les résultats de recherches faites isolément sans liaison entre elles.

Dans ces conditions, on ne doit pas s'étonner que les idées de ceux

1. E. BRÉAL, *Annales agronomiques,* t. XX, 1894, p. 353-370.

2. A. B. FRANK, *Berichte der deutschen botan. Gesellschaft,* vol. III, 1885, p. 128; vol V, 1887, p. 359; vol. VI, 1888, p. 248-269.

3. A. BAUMANN, *Ueber die Bestimmung des im Boden enthaltenen Ammoniakstickstoffs und über die Menge des assimilirbaren Stickstoffs im unbearbeiteten Boden.* Habilitationsschrift, 1886.

auxquels incombe, par devoir professionnel, la tâche de pénétrer les phénomènes soient jusqu'alors si divergentes.

En présence de ces lacunes, il faut chercher jusqu'à quel point les règles développées jusqu'ici peuvent être utilisées pour juger la question de l'état des matières organiques dans l'eau et surtout, puisque c'est le but de ce livre, au point de vue des intérêts de l'agriculture.

D'abord, en l'état actuel de nos connaissances sur les phénomènes de décomposition en général, abstraction faite des détails, on peut affirmer que toutes les matières organiques des eaux sont beaucoup moins aérées que celles des autres stations, à l'exception des sols marécageux. Cet accès limité de l'air doit avoir pour conséquence que l'érémacausis des matières organiques dans l'eau est non seulement restreinte, mais souvent remplacée par leur putréfaction, c'est-à-dire par ce processus qui entrave plus ou moins la volatilisation des matières organiques et favorise leur accumulation en masse.

Dans quelle mesure l'un ou l'autre de ces deux processus essentiellement différents l'emporte dans un cas donné, cela dépend évidemment des circonstances extérieures, surtout du degré d'accès de l'air, puis de la quantité et de la répartition des matières organiques dans l'eau et aussi de l'utilisation de ces substances par les animaux et les plantes aquatiques.

Les quantités d'oxygène que l'eau renferme sont déterminées par celles qui y sont reçues et celles qui y sont utilisées.

Il est clair que, pour une eau donnée, l'arrivée de l'air est plus grande dans les couches supérieures que dans les couches profondes parce que les premières sont plus près de l'atmosphère et que les courants verticaux sont très lents dans l'eau et assez souvent nuls surtout par les fortes chaleurs. Les éléments organiques en suspension se trouvent donc dans des conditions d'érémacausis plus favorables que ceux des zones profondes ou ceux qui gisent sur le fond où, en général, la putréfaction remplace l'érémacausis. Ce processus par putréfaction doit naturellement, toutes circonstances égales, s'étendre d'autant plus que la couche d'eau est plus épaisse.

A hauteur égale de lame d'eau, sa vitesse d'écoulement et son

mode de mouvement ont une grande influence sur la quantité d'air absorbée et par suite sur la décomposition des matières organiques. Dans les eaux stagnantes (viviers, étangs, lacs), l'agitation de l'eau est faible et n'est produite que par les vents dont l'action est en général proportionnelle à la surface de l'eau. Dès lors, il y a peu de matières organiques en suspension puisqu'elles peuvent aisément se déposer dans ces eaux tranquilles où elles forment avec les cadavres des animaux et les débris des plantes aquatiques une couche plus ou moins épaisse de limon. Les éléments organiques n'y sont soumis qu'à la putréfaction qui utilise complètement en outre la faible dose d'oxygène de l'eau. Ce qui montre clairement que ce processus intervient seul dans les circonstances données, ce sont les pratiques suivies dans l'exploitation des étangs. Par une longue stagnation, l'eau y devient de moins en moins favorable à l'éducation du poisson, qui ne peut se passer d'oxygène. Aussi, dans une exploitation rationnelle[1], adopte-t-on la règle de n'utiliser les étangs pour la production du poisson que pendant un certain temps et d'en cultiver le fond pendant quelques années afin de se débarrasser des dépôts qui y sont accumulés.

De plus, la grande résistance qu'offrent, comme on sait, à la décomposition les matières organiques enfouies dans la vase des étangs indique bien encore qu'elles se sont formées par le mode de la putréfaction.

Les eaux courantes (ruisseaux, rivières, fleuves) absorbent de bien plus grandes quantités d'oxygène que les eaux stagnantes et d'autant plus qu'elles sont plus rapides et se mélangent plus intimement à l'air. L'eau courant sur un fond lisse incorpore toujours moins d'air que celle qui cascade sur des obstacles ou qui devient écumeuse en heurtant des piles de pont ou en rebondissant sur les pierres de son lit. La proportion dans laquelle l'air dissous dans l'eau ou qui lui est mécaniquement mélangé est utilisé pour l'oxydation des matières organiques dépend, dans les eaux courantes, de la

1. Comme celle du domaine du prince de Schwarzenberg à Wittingau, en Bohême, qui est placée sous la direction de M. Sesta, si compétent dans la théorie comme dans la pratique de l'élevage du poisson.

composition, de la quantité et de la répartition de ces matières. Celles qui ont une densité suffisante gagneront le fond et se rassembleront dans les points où la vitesse de l'eau sera moindre. Au lieu de l'érémacausis, elles subiront la putréfaction, surtout si la couche d'eau est assez épaisse. Les circonstances seront bien plus favorables à la décomposition, les matières organiques seront plus énergiquement oxydées si elles sont finement pulvérisées et restent en suspension, ne pouvant vaincre la poussée de l'eau. Dans ces conditions, si l'air est dissous dans l'eau en assez grande quantité, tous les éléments organiques soit dissous, soit en suspension, sont rapidement et complètement oxydés, en admettant qu'il n'y en ait pas trop relativement à la masse aqueuse et que les matières soient par elles-mêmes facilement décomposables. Pour le premier point, on peut d'abord affirmer qu'il n'y a pas de limite déterminée, valable pour tous les cas, puisque nous avons montré que l'action oxydante de l'eau est très inégale. Quant au second point, il ne faut pas perdre de vue que toutes les matières organiques animales se décomposent bien plus facilement que celles d'origine végétale.

La composition chimique de l'eau a parfois aussi une action non négligeable sur la destruction de ces matières. Les eaux très calcaires forment des agrégats : les matières en suspension s'agglomèrent en grumeaux qui tombent au fond en formant des dépôts. Les carbonates alcalins favorisent la précipitation des particules entraînées mécaniquement et la formation de dépôts épais de limon. Si les eaux contiennent des substances qui tuent les micro-organismes intervenant dans la décomposition, comme il arrive lorsqu'on jette dans les rivières les eaux résiduaires de certaines industries, les réactions cessent et ne reprennent que quand les matières toxiques ont été suffisamment diluées.

Enfin, il y aurait encore à examiner la participation des animaux et des végétaux aux phénomènes en question. Les animaux empruntent à l'eau l'oxygène nécessaire pour leur respiration et dégagent de l'acide carbonique ; ils nuisent donc aux réactions oxydantes de l'eau. Les plantes aquatiques vertes décomposent l'acide carbonique et dégagent de l'oxygène ; mais, la nuit, elles se comportent comme les animaux. Suivant la proportion dans laquelle les organismes en

question et les éléments putrescibles existent dans l'eau, son taux d'oxygène sera plus ou moins influencé.

En embrassant d'un coup d'œil les facteurs qui viennent d'être décrits, on ne peut nier que, dans des conditions favorables, l'oxydation n'atteigne une intensité qui va jusqu'à produire la volatilisation complète de la matière organique et à déterminer cette propriété de certaines eaux connues en hygiène comme *s'épurant d'elles-mêmes*.

Vouloir de cette observation tirer la conclusion que cette propriété est l'apanage de tous les cours d'eau sans exception serait aller contre tous les faits connus jusqu'ici sur les conditions de la décomposition des matières organiques ; bien plus, on doit penser que, pour beaucoup d'eaux, on ne peut admettre l'hypothèse d'une puissante oxydation et la décomposition s'y fait dès lors suivant le mode de la putréfaction.

Nous ne pouvons clore ce chapitre sans indiquer que les processus de décomposition dans les eaux sont naturellement liés à l'intervention d'organismes inférieurs (champignons) [voir p. 117]. Il n'est guère admissible que des algues y contribuent d'une manière notable, comme on l'a maintes fois soutenu dernièrement, parce que ces végétaux n'existent qu'à l'état disséminé dans les eaux courantes, surtout dans celles qui s'épurent d'elles-mêmes, et ne peuvent dès lors influer directement sur la destruction des matières organiques. Le fait que les algues aient la faculté d'absorber les matières organiques et de les utiliser pour leurs tissus ne peut guère modifier notre opinion sur la « purification des eaux par les algues » ; car la quantité d'éléments extraits de l'eau par ce procédé est en tout cas faible et retourne à l'eau après la mort de ces organismes. On peut en dire autant des végétaux supérieurs à chlorophylle vivant dans l'eau.

DEUXIÈME PARTIE

PRODUITS DE DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

LES HUMUS

CHAPITRE I

FORMATION DES HUMUS

Il résulte de ce que nous venons dire sur la décomposition des matières organiques que leurs principes élémentaires se volatilisent en quantités et formes variables suivant les circonstances extérieures. Mais cette volatilisation n'est pas complète, si bien que, même dans les conditions favorables, il reste un résidu solide formé de matières organiques enfermant une partie des principes minéraux; ce résidu est l'humus, substance amorphe, généralement de teinte foncée, qui n'a pas de composition chimique définie, puisqu'elle est soumise à d'incessantes modifications et qui, dès lors, ne peut s'apprécier que par les caractères extérieurs.

Quant aux dépôts d'humus, il y a d'abord deux cas à distinguer suivant que les matières organiques se trouvent ou non en présence de l'air. Dans le premier cas (érémacausis), c'est la volatilisation qui domine et le dépôt d'humus s'y fait en quantité bien moindre que dans le second (putréfaction) où, *cœteris paribus*, la formation de

produits gazeux se réduit et celle de composés solides, peu ou pas volatils, augmente. C'est ainsi que *l'humus s'accumule en proportion beaucoup plus faible dans les lieux où se trouvent réunies les conditions de l'érémacausis que dans ceux où les matières organiques sont soumises à la putréfaction.*

Entre ces limites on constate des différences plus ou moins grandes tenant aux circonstances extérieures et à certaines propriétés des substances à décomposer.

Partout où, avec de l'air en suffisance, un taux moyen d'humidité et une température assez élevée provoquent une puissante érémacausis, l'humus ne se forme qu'en minime quantité; dans tous les cas où l'un des facteurs importants pour l'oxydation tombe au minimum, la volatilisation de la matière organique subit une diminution correspondante, compensée par l'augmentation corrélative des résidus solides de la décomposition. Le climat, la température, la composition du sol, etc., ont aussi de l'influence sur les dépôts d'humus. Leur épaisseur est faible, toutes choses égales d'ailleurs, dans un climat humide et de température constante; elle est très importante dans les régions plus froides. La chaleur favorise l'érémacausis seulement s'il y a une humidité suffisante; sans quoi, malgré la température favorable, la décomposition est si faible, que la matière organique reste longtemps presque sans changement. Aussi, les agriculteurs des régions arides de la Californie, par exemple, sont obligés de fabriquer d'abord des composts avec la paille et le fumier pailleux avant de mettre ceux-ci dans les champs[1]. De cet exemple et de bien d'autres il ressort clairement que les conditions climatériques essentielles exercent les unes sur les autres des actions réciproques variées dont la résultante se manifeste dans la diversité des dépôts d'humus. En général, on peut admettre (et cela est confirmé par l'observation) que *l'accumulation des matières humiques croît avec l'abaissement de la température, mais cette influence est modifiée par l'humidité des lieux considérés.*

Le sol a, comme le climat, des rapports très variables avec les

---

1. E. W. Hilgard, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 103.

phénomènes en question. Plus est grande sa perméabilité, moins les matières humiques peuvent s'y accumuler, en supposant qu'il renferme des quantités d'humidité suffisantes pour l'érémacausis.

Si ce n'est pas le cas, la matière organique ne se décompose que lentement en laissant un résidu assez abondant ; c'est ce qui arrive sur les sols à grain très fin, parce que la quantité d'air qu'ils renferment est insuffisante, dans les conditions ordinaires, pour une eremacausis active. Quelquefois même l'air y peut être si rare que la matière organique se décompose par le mode de putréfaction et s'accumule dès lors en couches épaisses. Il y a tous les degrés entre ces extrêmes suivant la perméabilité des sols, et ces degrés sont représentés par des formes très variées, parce que la qualité dont nous parlons, quoique la plus importante, n'est pas la seule qui influe sur l'érémacausis.

Vouloir entrer plus avant dans les processus qui résultent de l'action de tous ces facteurs, tantôt concurrents, tantôt antagonistes, entraînerait des longueurs qui peuvent d'autant mieux être évitées qu'il n'y a aucune difficulté à se faire une opinion sur la question en se référant à la loi citée plus haut (voir p. 205) et aux exemples qui ont été brièvement rapportés ici.

Pour l'accumulation des produits de la décomposition qui se fait en l'absence de l'air, la température a une importance particulière. Sous les tropiques, avec une insolation continue, la fermentation peut aller si vite, qu'il n'y ait pas de couche d'humus en quantité un peu considérable. Avec l'abaissement de la température suivant la latitude ou l'altitude, les produits de décomposition vont en augmentant, formant des couches de plus en plus puissantes de matières organiques en putréfaction.

Outre les influences en question, la quantité de la matière organique produite dans les diverses circonstances locales et son altérabilité pèsent ici d'un grand poids. Plus les conditions naturelles sont favorables à la végétation, plus grande est la masse de substance végétale produite, et inversement. C'est pourquoi, par exemple, il se forme plus d'humus dans les régions humides que dans les pays arides où, par suite du manque d'eau, les plantes ne fabriquent qu'une petite quantité de matière végétale. Ceci ressort net-

tement des recherches de E. W. Hilgard[1] qui, dans les sols les plus divers de la Californie, a trouvé pour les zones humides ou sèches les quantités moyennes suivantes d'humus (matière noire de Grandeau)[2] :

Taux moyen d'humus du sol pour 100.

Région humide.	Région aride.	
	Plaines.	Collines.
3,04	0,99	0,75

De même, pour tous les autres cas, la formation de l'humus, toutes circonstances égales, est déterminée par la puissance de production des plantes, en ce sens que la proportion de résidus incorporés au sol varie avec sa fertilité.

Ce qui a été dit plus haut (voir p. 164) peut servir à déterminer dans quelle mesure l'altérabilité des matières organiques influe sur les dépôts d'humus. D'une manière générale, *l'érémacausis est beaucoup plus complète pour les matières animales, à l'exception des parties cornées et chitineuses, que pour les produits végétaux.* Ceux-ci présentent à leur tour de grandes différences suivant leur taux en principes albuminoïdes et suivant leurs diverses propriétés physiques. Les parties sèches des plantes se décomposent plus lentement que les parties vertes, les pailles des légumineuses plus vite que celles des céréales et celles-ci, à leur tour, plus vite que les arbres feuillus et résineux ; vient ensuite le bois, et de toutes les matières végétales employées en agriculture c'est la tourbe qui se décompose le plus lentement, *tous les produits de la putréfaction parmi lesquels on compte la tourbe se distinguant par leur extraordinaire fixité, même dans le cas où ils sont soumis aux conditions de l'érémacausis.*

Enfin, pour un seul et même sol, l'enrichissement en humus dépend de son mode d'exploitation.

Les cultures où le sol est occupé longtemps ou toujours par les plantes (fourrages vivaces, prairies, forêts) présentent sous ce rap-

1. *Forschungen, etc.,* vol. XVII, 1894, pp. 478-485.
2. Voir plus loin.

port une grande différence avec celles où la durée de végétation des plantes cultivées est courte. Dans le sol agricole travaillé, malgré l'adjonction d'engrais organiques, l'humus est en bien plus faible quantité que dans les terrains de même composition, constamment garnis de végétation (prairies, forêts), le premier réalisant, à un bien plus haut degré, les conditions requises pour une active décomposition. Les sols nus, soit travaillés et fumés, soit en friche et non fumés, subissent à la longue une diminution dans leur taux d'humus par volatilisation d'une partie de leur matière organique, tandis que le sol garni de plantes pérennes (prairies, forêts), grâce aux restes de racines mourant chaque année et ne se décomposant que lentement, compense ainsi son appauvrissement ou même s'enrichit constamment.

Relativement à l'action des cultures sur le taux d'humus des sols nous possédons de nombreux documents, avec chiffres à l'appui, fournis surtout par J.-B. Boussingault, Truchot[1], H. Joulie[2], J.-B. Lawes et J.-H. Gilbert[3], P.-P. Dehérain[4] et moi.

P.-P. Dehérain, qui a fait sur cette question des recherches approfondies, a dosé l'azote et le carbone dans quatre parcelles qui avaient reçu, de 1875 à 1877, des engrais à doses massives et qui, dans les quatre années suivantes (1878-1881), avaient porté sans fumure diverses récoltes. Les analyses, faites en 1878 et en 1881 après la quatrième récolte, ont donné les résultats suivants :

Taux de carbone du sol (en grammes par kilogramme).

Fumure précédente :	FUMIER.	NITRATE de soude.	SULFATE d'ammoniaque.	RIEN.
Maïs-fourrage :				
1878.	16,7	13,2	15,2	15,2
1881.	8,0	6,1	»	7,6

1. *Annales agronomiques,* t. I, 1875, p. 35.

2. *Revue des Industries chimiques et agricoles,* t. V, 1881, pp. 350-370.

3. *Ann. de Chim. et de Phys.,* série 6, t. II, p. 511, et *Journ. of the Agric. Soc. of England,* vol. XXV, part. I. Londres, 1889.

4. *Annales agronomiques,* t. VIII, 3e fasc., 1882, pp. 321-356, et t. XII, 1er fasc., pp. 17-24.

Fumure précédente :	FUMIER.	NITRATE de soude.	SULFATE d'ammoniaque.	RIEN.
Pommes de terre (2 années), puis céréales (2 années) :				
1878.	21,3	14,6	17,0	16,2
1881.	»	8,8	»	7,1
Sainfoin :				
1878.	13,4	12,8	»	12,9
1881.	12,2	12,4	»	13,3

Taux d'azote du sol (en grammes par kilogramme).

Maïs-fourrage :				
1878.	2,01	1,79	1,88	1,67
1881.	1,68	1,45	1,62	1,45
Pommes de terre (2 années), puis céréales (2 années) :				
1878.	2,08	1,78	1,74	1,74
1881.	1,69	1,67	1,54	1,69
Sainfoin :				
1878.	1,50	1,50	1,51	1,46
1881.	1,65	1,52	1,56	1,50

Dans une seconde expérience, le même auteur a cherché à déterminer l'action du gazon succédant à celle du sainfoin, et il a obtenu les chiffres intéressants qui suivent :

Taux d'azote du sol par hectare (en kilogrammes).

CULTURES.	DATE de la prise des échantillons.	FUMÉ en 1875, 1876 et 1877 avec du fumier et après sans fumure.	NON FUMÉ.
Luzerne, 1870-1875. . .	1875	7 854	7 854
Betteraves, 1871-1877. . / Maïs-fourrage, 1878. . .	1879	5 775	5 621
Sainfoin, 1879-1881. . .	1881	6 352	5 775
Sainfoin, 1882-1883 . . / Gazon, 1884-1885 . . .	1885	6 814	6 352

Lawes et Gilbert sont arrivés à des résultats semblables : ils ont trouvé que le sol cultivé (champ d'orge) était moins riche en carbone et en azote que le sol garni de plantes vivaces.

L'action des diverses cultures sur l'enrichissement du sol en matière organique s'est montrée plus nette dans mes expériences[1].

5 caisses percées en dessous, ayant 2 mètres carrés de surface et $0^m,50$ de hauteur, en fortes planches, furent enfoncées dans le sol (essai I); dans l'essai II, 5 lysimètres de même dimension furent, au printemps de 1886, remplis identiquement de sable calcaire contenant de l'humus. 5 épicéas de cinq ans, aussi égaux que possible, furent plantés de la même façon dans chacune des cases A et B. La case C reçut 5 plants de bouleau du même âge, la case D fut gazonnée et la case E resta nue. Sur la case B, après la plantation (printemps 1886), on répandit en couverture des aiguilles d'épicéa sur 10 centimètres de hauteur jusqu'au printemps de 1889 ; après, on mit une couverture de mousse de même épaisseur.

Au printemps de 1892 pour les caisses en bois et à l'automne de 1893 pour les lysimètres, on ôta les couvertures et dans chaque case on prit, au moyen d'une sonde et jusqu'au fond, environ 100 échantillons qu'on mélangea et tamisa avec le plus grand soin. On détermina le taux de carbone par combustion avec l'oxyde de cuivre et celui d'azote par la méthode de Kjeldahl.

Voici les résultats obtenus :

Taux centésimal de carbone du sol séché à 105°.

	A. ÉPICÉAS sans couverture.	B. ÉPICÉAS avec couverture.	C. BOULEAUX.	D. GAZON.	E. SOL NU.
Essai I. . . .	2,313	2,844	2,103	2,879	1,578
Essai II. . . .	2,297	2,878	2,359	2,918	1,857

Taux centésimal d'azote du sol séché à 105°.

	A.	B.	C.	D.	E.
Essai I. . . .	0,245	0,269	0,231	0,275	0,213
Essai II. . . .	0,257	0,273	0,259	0,305	0,217

On voit par ces chiffres que *les sols pourvus de végétation étaient, après six ou sept années, sensiblement plus riches en carbone et en*

1. *Forschungen, etc.*, vol. XIX, 1896, pp. 161 et 165.

azote que le sol nu. Ces différences tiennent à ce que le sol nu subit une perte en matière organique par suite de sa destruction, tandis que le sol planté, où cette destruction est moindre et largement compensée par les racines qui meurent chaque année, s'enrichit, au contraire. C'est ainsi que le taux élevé de carbone et d'azote du sol planté comparé à celui du sol nu accuse, au profit du premier, un enrichissement en ces deux éléments[1].

Il est à remarquer que le sol gazonné et le sol portant des épicéas avec couverture montrent une plus forte augmentation en matière organique que le sol planté en bouleaux ou bien en épicéas sans couverture. Cela tient probablement à ce que le gazon laisse plus de racines et à ce que les épicéas se développent plus vigoureusement grâce à la couverture (c'était le cas en effet[2]), et renferment dès lors, dans leur système radiculaire, plus de matière organique qu'il ne s'en forme dans la case sans couverture.

En examinant de près les résultats des expériences précédentes, on voit clairement que *la terre qui est cultivée tous les ans s'appauvrit en substance organique, quelle que soit l'addition de fumier; cet appauvrissement prend fin et le sol s'enrichit quand on cesse de travailler le sol et qu'il est occupé par des plantes vivaces*. Sauf en ce qui concerne l'azote, dont il sera parlé dans la troisième partie, ce fait tient en général à ce que les plantes agricoles à vie éphémère ne laissent dans le sol que peu de racines, et qui se détruisent beaucoup plus vite, vu la perméabilité du sol et l'accès facile de l'air, que dans le cas où le sol est garni de végétation d'une manière permanente.

L'action exercée à ce point de vue par les diverses cultures offre des degrés variables suivant le développement, la densité et la durée de végétation des plantes. Plus celles-ci sont serrées et puissamment développées, plus leur végétation est longue, plus considérable aussi, en général, est le dépôt d'humus, parce que les résidus augmentent

1. L'enrichissement réel n'aurait pu se mesurer que si l'on avait déterminé les taux de carbone et d'azote des sols avant l'installation des expériences. Cela n'a pas été fait, parce que les essais en question avaient d'abord un autre but et qu'on ne prévoyait pas de modifications dans la composition du sol.

2. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 179.

dans la même proportion et que diminuent d'autant les conditions favorables à une intense érémacausis (voir p. 234 et 242). Dans les cultures où l'enrichissement du sol en humus se fait sur la plus grande échelle, il s'apprécie d'après les facteurs précédents, et aussi d'après certaines particularités des végétaux et du sol.

Les arbres forestiers, qui enfoncent leurs racines dans le sol à de grandes profondeurs, étendent leur influence bien plus loin que le gazon dont les organes souterrains n'occupent que les couches superficielles qu'elles enrichissent à peu près exclusivement.

Dans des stations modérément humides, le dépôt d'humus se fait plus vite que dans les lieux très humides, l'érémacausis se fait plus activement dans le premier cas que dans le second, où l'accès de l'air est plus ou moins entravé par la trop forte proportion d'humidité du sol. C'est pourquoi les prés hauts sont moins riches en humus que les prés bas. Comme l'augmentation du taux d'humus est liée à une semblable augmentation dans la faculté d'imbibition du sol, on comprend que pour les prairies, qui se trouvent déjà naturellement dans des lieux humides, le taux d'eau du sol puisse devenir tel que l'air n'y puisse plus du tout pénétrer et que la masse d'humus accumulée en ces points soit dès lors soumise aux processus de la putréfaction.

Dans les forêts, l'humus se forme non seulement dans, mais sur le sol ; les feuilles et les aiguilles tombées, la mousse dans les peuplements de résineux, sont soumises à l'érémacausis, qui est plus ou moins rapide, suivant l'intensité du couvert. Dans les forêts auxquelles on laisse leur couverture, il se produit à la surface une couche plus ou moins épaisse d'humus, parcourue par une partie des racines des arbres, et portant une végétation basse des plus variées. Dans les forêts, la production de l'humus est généralement plus abondante à la surface du sol que dans son intérieur, parce que la quantité des racines qui meurent chaque année est bien plus faible que celle des feuilles qui tombent.

La proportion suivant laquelle se fait en forêt l'accumulation d'humus dépend naturellement de plusieurs influences extérieures [1].

1. E. Ebermayer, *Die gesammte Lehre der Waldstreu*. Berlin, 1876, p. 205.

Dans les massifs pleins d'âge moyen, il s'en forme plus que dans les vieux massifs ouverts et sur le retour. Dans ceux à couvert épais (hêtre, épicéa, sapin), il y en a plus que dans ceux à couvert léger (chêne, pin, mélèze).

L'exploitation en futaie avec massifs pleins longtemps maintenus doit être plus favorable à la production de l'humus que l'exploitation en taillis sous futaie, laquelle vaut mieux à son tour que celle en taillis simple, où le sol reste nu assez souvent, à de courts intervalles. Le régime de la futaie est donc le plus propre à améliorer le sol forestier. Si, dans l'espace d'une révolution (cent à cent vingt ans), on n'a pas enlevé la couverture, on peut être sûr que même un mauvais sol est transformé en un sol forestier substantiel. Les montagnes favorisent plus que les plaines le dépôt d'humus ; les versants exposés au nord et à l'ouest, les cuvettes et les dépressions sont d'ordinaire plus riches en humus forestier que les versants qui regardent le sud et l'est et que les endroits exposés au vent où les feuilles sont constamment enlevées. Dans les vides, dans les coupes à blanc étoc, dans les peuplements clairiérés, dans ceux exploités à courte révolution ou qui sont sur le retour, se montrera bientôt la pauvreté en humus. Enfin, à autres conditions égales, les sols argileux doivent être plus riches en humus que les sols calcaires ou sablonneux.

On comprend, d'après ce que nous venons de dire, que le taux d'humus des sols varie extrêmement et peut passer par toutes les valeurs possibles. Pour désigner les sols d'après leur taux d'humus, il sera bon d'adopter les termes de W. Knop[1], qui a distingué les catégories suivantes[2] :

0 — 2,5	pour 100 d'humus :	sol pauvre en humus.
2,5 — 5	—	sol humifère.
5 — 10	—	sol humique.
10 — 15	—	sol riche en humus.
> 15	—	sol excessivement riche en humus.

1. W. Knop, *Die Bonitirung der Ackererde*. 1871, p. 67.

2. J'ai abaissé à 2.5 p. 100 les limites des deux premières catégories que Knop avait fixées à 3 p. 100.

Les chiffres suivants [1], rapportés à la matière séchée à l'air, donnent une idée du taux d'humus de quelques sols :

		HUMUS p. 100
1	Sable argileux, vignoble (d'après FREY)	0,340
2	Sol de désagrégation du lias, sol arable fertile (d'après FREY)	0,628
3	Sol de désagrégation du grès liasique, de Hohenheim (d'après E. WOLFF)	0,825
4	Sable pur de Lauenbourg, sol d'une très faible fertilité (d'après W. KNOP)	0,930
5	Sable argileux humique, surface d'un diluvium marneux, de Rixdorf près Berlin (d'après Ernst SCHULZ)	1,130
6	Même sol, de Friedenau près Berlin (d'après Ernst SCHULZ)	1,230
7	Bon sol à blé et trèfle, de Bockwa près Zwickau (d'après KNOP)	1,350
8	Lehm sableux, sol arable, de Möckern (d'après KNOP)	1,410
9	Excellent sol à blé et trèfle, de Mattstedt près Apolda (d'après KNOP)	1,750
10	Sol de lõss, Langenweddingen (Magdebourg)	1,780
11	Diluvium sableux, pineraie, Eberswalde (d'après W. SCHÜTZE)	0,555-1,825
12	Argile rouge compacte, alluvion, Rossla dans le Harz	2,044
13	Lehm, alluvion de la Saale, Benkendorf	2,080
14	Sol de désagrégation du calcaire liasique, Hohenheim (d'après E. WOLFF)	2,091
15	Alluvion du Nil, sol arable du Caire (d'après KNOP)	2,214
16	Lehm sableux, produit de la désagrégation du grès rouge, près Kyffhäuser	2,214
17	Sol fangeux marneux, Tempelhof près Berlin (d'après WAHNSCHAFFE)	2,470
18	Lehm sableux, alluvion, Prerau	2,727
19	Lehm sableux, alluvion, Brodau en Bohême	2,856
20	Argile alluviale de Kreudorf, provenant de basalte et de calcaire	2,883
21	Sable argileux, forêt de hêtres, Danemark (d'après TUXEN)	1,120-3,040
22	Sol sablonneux, forêt de chênes, Danemark (d'après TUXEN)	3,080
23	Sol sablonneux, terre de bruyère, Danemark (d'après TUXEN)	0,34-3,300
24	Lehm sableux, lõss, Ferbenz, Bohême	3,515
25	Lehm siliceux rouge, alluvion, Nordhausen	3,525
26	Lehm compact, alluvion, Neuhof en Silésie	3,573
27	Lehm humique, lõss, Ploscha, Bohême	3,973
28	Grès bigarré, sol arable, Neuenburg, Wurtemberg	3,990
29	Argile d'alluvion, Prague	4,173
30	Sol syénitique, terre à betterave, Blansko en Moravie	4,270
31	Lehm humique, alluvion, jamais fumé, Gruszka, Galicie	4,845
32	Diluvium calcaire, Munich (terre fine, d'après WOLLNY)	2,7 — 5,031

1. Ces chiffres sont tirés d'un travail de W. OLLECH : *Ueber den Humus und seine Beziehungen zur Bodenfruchtbarkeit*, Berlin, 1890, et de quelques analyses faites par W. SCHÜTZE (*Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen*, I, p. 50, et III, p. 360), par C.-F.-A. TUXEN (*Studien über die natürlichen Humusformen*, par P.-E. MULLER, Berlin, 1887), par M. FLEISCHER (*Landw. Jahrbücher*, 1890), par C. SCHMIDT (*Baltische Wochenschrift*, 1880, n°s 25 et 26, et 1881, n°s 10 et 11), par P. KOSTYTSCHEFF (*The Soil*, Chicago) et par moi.

		HUMUS p. 100.
33	Sol marécageux, Oldenbourg	5,150
34	Sol des marais de l'Oder, alluvion, Kienitz	5,591
35	Sol marécageux, taupinière, Oldenbourg	6,012
36	Argile d'alluvion, Prague	6,168
37	Sol noir de marais avec sous-sol argileux (d'après E. WOLFF)	6,535
38	Terreau de hêtre, Danemark (d'après TUXEN)	5-10-8,330
39	Sol marneux de marais, alluvion récente, marais de Hopfen à Teltow (d'après WAHNSCHAFFE)	9,480
40	Sol marécageux de Dollard, fraîchement colmaté	12,000
41	Terre noire de Russie, *Tschernosem* (d'après C. SCHMIDT et P. KOSTYTSCHEFF), ordinairement 8-10 p. 100 ; limites extrêmes	5,42-16,340
42	Tourbe de bruyère, Danemark (d'après TUXEN)	41,500
43	Tourbe de hêtre, Danemark (d'après TUXEN)	34,70-48,510
44	Tourbe de hêtre à forme de terreau, Danemark (d'après TUXEN)	62,500
45	Tourbe de marais de Mögsjökärret près Reijmyra, Suède (d'après V. POST)	73,051
46	Marais de bas-fond, Cunrau (d'après E. WOLLNY)	69,012-74,563
47	Marais de bas-fond, marais du Danube à Neuburg, Bavière (d'après E. WOLLNY)	69,167-77,994

En général, *les matières humiques ne sont pas également réparties dans le sol*, mais, à part quelques exceptions, *elles vont en diminuant à partir de la surface*. On l'a démontré expérimentalement pour les sols forestiers comme pour la terre noire de Russie.

Ainsi, C.-F.-A. TUXEN [1] a trouvé dans des sols de forêts de hêtre :

Essai I.

TAUX D'HUMUS DU SOL POUR 100.			
Sol.		Sous-sol.	
Couche supérieure.	Couche inférieure.	Couche supérieure.	Couche inférieure.
2,67	1,23	0,31	0,29

Essai II.

TAUX D'HUMUS DANS LES COUCHES ÉLOIGNÉES DE LA SURFACE			
de 4-8 pouces.	de 12-22 pouces.	de 27-33 pouces.	de 36-42 pouces.
1,35	0,55	0,22	0,21

1. TUXEN, dans P.-E. MÜLLER, *Die natürlichen Humusformen*. Berlin, 1887, pp. 111 et 300.

La distribution des matières humiques dans le tchernosem est la même, comme le montrent les chiffres suivants[1] :

A une profondeur de :	1	2	3	4	5
—	—	—	—	—	—
pouces.	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
1-6	5,42	8,11	9,29	9,64	10,11
6-12.	4,83	5,19	6,23	7,71	6,81
12-18.	3,63	3,92	4,33	6,71	5,57
18-24.	2,56	2,84	2,20	5,61	4,36
24-30.	2,58	2,11	»	3,51	3,58
30-36.	1,88	1,47	»	3,18	1,93
36-42.	1,29	0,51	»	1,56	»

Les prairies de l'Amérique du Nord et les pampas de l'Amérique du Sud, qui appartiennent aussi aux formations de terres noires, se comportent de même[2]. Tous les autres sols couverts d'une végétation spontanée doivent accuser une semblable répartition des matières humiques. Leur diminution, à partir de la surface, tient, sans aucun doute, à ce que les racines dont sont formées les matières organiques se développent d'autant plus abondamment qu'elles sont plus près de la surface et aussi à ce que les différences à ce point de vue sont incomparablement plus grandes que celles qui se rapportent à la décomposition des restes de racines dans les diverses zones, décomposition qui s'accroît de bas en haut.

1. P. KOSTYTSCHEFF, *Annales de la Science agronomique,* 1887, t. II, pp. 165-191 ; en outre : C. SCHMIDT, *Baltische Wochenschrift,* 1880, n°s 25 et 26, 1881, n°s 10 et 11. — W. DOKOUTCHAEFF, *Tschernozème de la Russie d'Europe.* Saint-Pétersbourg, 1879.

2. Les formations de terres noires n'existent en Allemagne que sur quelques points de la Silésie et des environs de Magdebourg.

CHAPITRE II

CLASSIFICATION ET PROPRIÉTÉS DES DIVERS HUMUS

Les matières humiques telles qu'elles existent dans la nature ont des propriétés qui diffèrent beaucoup, surtout suivant les circonstances extérieures qui ont présidé à leur production, si bien que l'on peut, d'après ces circonstances, ranger les humus en groupes plus ou moins nettement délimités. Le présent chapitre ne peut donner à cet égard que des notions approchées, parce que nos connaissances sont encore insuffisantes et qu'une classification des formes d'humus répondant à toutes les exigences n'est pas possible pour le moment.

1. — Les produits de l'érémacausis.

a) *Humus formés dans de bonnes conditions.*

Les humus formés sous l'action de l'oxygène de l'air, d'une humidité modérée et d'une température convenable ont pour caractère commun de se détruire plus ou moins vite en donnant de l'acide carbonique, de l'eau, de l'ammoniaque, en laissant comme résidu les principes minéraux contenus dans la matière organique et d'avoir une réaction *alcaline* ou *neutre*. On les désigne ordinairement sous le nom d'*humus doux;* mais il serait préférable d'employer une expression plus juste, par exemple celle de *Mull* (terreau) proposée par P.-E. Müller[1]. Suivant le lieu où il s'est formé, on distinguera un terreau agricole et un terreau forestier.

1.-P.-E. Müller, *Die natürlichen Humusformen*. Berlin, 1887. Nous emploierons dans ce livre le mot *terreau* comme équivalent du terme allemand *Mull*. Les horticulteurs et les sylviculteurs le connaissent déjà ; le *terreau* des jardiniers, le *terreau neutre* ou simplement le *terreau* des forestiers sont des humus doux, c'est-à-dire des *Mull* en allemand. (Trad.)

Le *terreau agricole* provient des débris des récoltes et des substances organiques apportées au sol; c'est une sorte d'humus qui se décompose extrêmement vite par suite des conditions favorables à l'érémacausis et, par suite, ne s'accumule en quantités un peu considérables que dans des cas assez rares, s'il s'agit de terre arable ameublie, bien perméable à l'air. Ceci n'arrive que si le sol reste assez longtemps sans labours dans certaines cultures (fourrages vivaces), s'il est à grain fin et par suite peu perméable. Qu'on ameublisse de tels sols, les dépôts humiques qui s'y étaient formés se décomposent bientôt.

Le *terreau forestier* comprend l'humus du sol (*Waldmull*) et l'humus de la couverture (*Streumull*). Le premier provient des racines des arbres qui meurent chaque année dans le sol. Dans les sols forestiers à texture grumeleuse, ces matières humiques se comportent comme celles des champs labourés, mais se décomposent plus lentement, parce que la température du sol forestier est inférieure en moyenne à celle du sol agricole. C'est certainement le cas pour l'humus qui se forme dans un sol difficilement perméable. L'humus de la couverture recouvre d'ordinaire le sol en couche mince; il se présente rarement en lits un peu épais, parce que la couverture se décompose trop vite. Il est grumeleux et recouvert habituellement d'une couche meuble de détritus de faible épaisseur. Les éléments de cet humus se distinguent partout à ce qu'ils offrent un mélange intime de matières organiques avec les éléments minéraux du sol.

Le taux des matières organiques est de 5 à 10 p. 100. Cet humus de la couverture est largement répandu, surtout là où le sol est couvert d'une végétation puissante et dense. D'après les plantes auxquelles ce terreau doit sa naissance, on peut distinguer le terreau des forêts feuillues (hêtre, chêne, etc.), le terreau des forêts résineuses (épicéa, pin, etc.), le terreau de bruyère, etc.

L'humus de la couverture est habité par un grand nombre d'organismes soit végétaux (myxomycètes, mucorinées, bactéries), soit animaux (vers de terre, myriapodes, nématodes, etc.).

Les animaux concourent à la formation de l'humus en dilacérant les résidus végétaux, en mêlant leurs déjections à la masse et en y laissant leurs cadavres. Ainsi s'explique la présence dans l'humus de parties du corps des insectes difficilement altérables (chitine).

La flore caractéristique des sols à terreau comprend surtout, d'après P.-E. Müller, les plantes suivantes : forêts de hêtres : *Asperula odorata, Mercurialis perennis, Milium effusum, Melica uniflora, Anemone nemorosa* et *ranunculoides, Oxalis acetosella, Phegopteris polypodioides, P. dryopteris*; forêts de chênes : *Trifolium medium, Viola canina, Vicia cracca, Lathyrus montanus, Hypericum perforatum, Galium saxatile, Campanula rotundifolia* et *persicæfolia, Succisa pratensis, Holcus mollis, Adoxa moschatellina*, etc. Pour les pineraies, il faut signaler l'absence des bruyères, des airelles et en partie aussi de la fougère impériale.

Enfin, on pourrait encore nommer ici le terreau de vase (*Schlammmull*, d'après H. von Post [1]) qui, dans les eaux oxygénées, forme une masse très finement grenue, d'un brun gris ouvert, provenant d'excréments d'animaux aquatiques, de restes d'algues et d'infusoires, et décomposée par des bactéries. On n'y reconnaît plus aucune structure et généralement elle ne forme qu'une couche peu épaisse. Cet humus est d'ordinaire mélangé à de la matière inorganique et en proportion telle que son taux de substance organique dépasse rarement 20 p. 100.

b) *Humus formés dans de mauvaises conditions.*

Les humus de cette catégorie forment, dans une certaine mesure, le passage entre les produits de l'érémacausis et ceux de la putréfaction, se rapprochant de l'un ou de l'autre groupe, suivant les circonstances extérieures. Ils se distinguent du terreau en ce que, là où ils existent en assez grande quantité, ils forment des couches compactes, serrées et ont une réaction *acide*. Il n'y a pas, jusqu'alors, de terme convenant à ces formes d'humus; celui de *tourbe* (*Torf*) proposé par P.-E. Müller pourrait prêter à confusion, puisqu'on comprend généralement sous ce nom les produits de la putréfaction. C'est généralement le nom de *Rohhumus* (*humus brut*) qui est usité ; nous l'emploierons, faute d'un meilleur.

Les conditions de formation de l'*humus brut* sont très diverses et se présentent chaque fois qu'un des facteurs nécessaires pour une érémacausis intense atteint son minimum.

1. *Landwirthschaftliche Jahrbücher*, 1888, pp. 405-420.

L'humus brut se forme donc quand l'air ne pénètre pas suffisamment, quand la température est trop basse (pays septentrionaux) et l'eau trop abondante en même temps (bords de la mer, hautes montagnes), ou quand l'humidité fait défaut (sécheresse due à la température, à la composition et situation du sol, au desserrement des massifs) ou quand le sol est pauvre en principes nutritifs. Toutes ces conditions défavorables à l'érémacausis peuvent provoquer le dépôt de matières humiques à un état plus ou moins décomposé, sous forme d'une couche compacte à la surface du sol. Suivant l'endroit où ils se forment, ces humus peuvent se classer dans les groupes suivants :

L'*humus brut des steppes* forme une partie intégrante des sols des prairies, des pampas et des terres noires. Ces sols sont surtout occupés par une végétation herbacée où domine, dans les steppes russes, *Stipa pennata*[1]. On y trouve aussi, moins abondamment, *Stipa capillata, Festuca ovina, Kœleria cristata*. Dans les steppes kirghiz, *Stipa capillata* et *Elymus junceus* forment la majeure partie du peuplement. Le sol est formé d'une matière à grains très fins qui correspond, en général, au löss par ses propriétés et qui renferme en proportions variables (6-16 p. 100) des matières organiques provenant de la décomposition des plantes des steppes. D'après les recherches de P. Kostytscheff, la terre noire (*tschernozem*) du gouvernement d'Ekaterinoslaw a la composition physique suivante :

	PROFONDEUR					
	0-6 pouces.	6-12 pouces.	12-18 pouces.	24-30 pouces.	30-36 pouces.	36-42 pouces.
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
Éléments fins .	34,5	35,3	35,7	37,0	37,7	30,3
Sable	50,5	50,5	54,3	56,1	56,7	50,8

La finesse extraordinaire des grains du sol, telle qu'elle résulte des chiffres qui précèdent, et leur étroite juxtaposition font que l'humidité pénètre à peu de profondeur (jamais au delà de 1 mètre, même en hiver); donc peuvent seules y prospérer les plantes qui exigent peu d'humidité dans le sol et qui ont une courte période de végétation. Aussi, les forêts ne se trouvent-elles pas sur des sols de

1. *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 76, et vol. XIV, 1891, p. 261. — Voir aussi *The Soil*, Exposition de Chicago, p. 11.

cette composition ; on ne les rencontre que sur les points où le terrain, grâce à son grain plus gros, se laisse pénétrer plus facilement par les pluies jusqu'à d'assez grandes profondeurs. Dans la région des terres noires, ces sols à gros grains sont occupés par les forêts, tandis que la steppe s'étend sur les sols à grain fin. C'est donc la nature du sol qui amène *soit la forêt, soit la steppe.*

P. Kostytscheff prouve que les différences dans les formes de la végétation des steppes ne sont pas dues à des influences climatériques.

Il s'appuie sur des observations météorologiques montrant que forêts et steppes ont le même climat et que des steppes complètement identiques par leur flore peuvent être exposées à des conditions climatériques très différentes. Par contre, de nombreux exemples parlent en faveur de l'influence des propriétés physiques du sol sur la distribution des formes de la végétation. Ainsi, les sols à gros grain qui pénètrent dans la région des terres noires sur sa limite septentrionale présentent toujours leur végétation forestière caractéristique. Sur les points plus élevés où les éléments les plus fins du sol ont été lixiviés et enlevés facilement par les eaux pluviales, le sol est à grain plus gros que dans la terre noire intacte et la végétation se distribue également d'après les propriétés physiques du sol.

Les forêts se présentent plus abondantes sur les hauteurs et les steppes dans les dépressions. Un examen plus approfondi des sols de cette région fournit une preuve plus convaincante des rapports qui existent entre la composition physique du sol et les formes de la végétation. D'après les recherches de Dokutchaeff, les sols du gouvernement de Nijni-Nowgorod présentent la composition suivante :

	SABLE.	HUMUS.	ÉLÉMENTS plus fins que 0,01 mm.	plus gros que 0,01 mm.
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
1 Plateau de terre noire (sols argileux compacts)	37,4	10,1	58,3	41,2
2 Vallée de terre noire (sols argileux)	59,4	6,3	35,5	63,2
3 Sols de forêt gris foncé (lehm compact)	66,4	4,1	28,3	70,8
4 Sols gris (lehm de compacité moyenne)	76,2	2,9	21,5	78,0
5 Sols de lehm léger	81,4	1,9	17,3	81,4
6 Sols de lehm sableux	87,2	1,6	9,3	?
7 Sols de sable lehmeux	91,8	1,1	7,0	?
8 Sols de sable quartzeux	97,1	0,3	2,3	97,5

Les steppes ne se voient que sur les trois premiers groupes de ces sols, peut-être aussi exceptionnellement sur ceux du quatrième groupe. Le plus grand nombre des sols de ce quatrième groupe et tous les sols des groupes suivants portent, sans exception, des forêts. On a fait les mêmes constatations pour d'autres points du domaine des steppes asiatico-européennes.

Ainsi, Krassnoff a trouvé dans le Tian-Schan des formations de steppes sous les climats les plus divers, depuis la zone des cultures jusqu'à la zone alpine. D'après Richthofen, les forêts manquent complètement sur le löss, et, selon Whitney, forêts et prairies dans l'Amérique du Nord se répartissent d'après la composition du sol, qui est très voisine de celle des steppes asiatico-européennes, comme le montrent les analyses suivantes :

	TERRE NOIRE DE RUSSIE (d'après Rispolajenski et Gordjagin).			SOL DE PRAIRIE (d'après Osborne).	
	1	2	3	1	2
Particules plus fines que $0^{mm},01$. .	47,00	24,20	32,00	44,33	37,39
— de $0^{mm},01$ à $0^{mm},05$ . .	45,00	50,25	50,65	41,48	43,58
— de $0^{mm},05$ à $0^{mm},25$ . .	7,50	20,25	16,80	3,35	2,48
— plus grosses que $0^{mm},25$.	0,50	1,25	0,50	0,10	0,62

Le sol des pampas de l'Amérique du Sud est certainement semblable à ceux-là, puisqu'on sait que le löss, partout où il se présente, a la même composition.

Il résulte de ce que nous venons de dire que la forêt s'empare des sols à gros éléments, la steppe de ceux à éléments fins, quelles que soient les conditions climatériques. Cela tient à ce que, dans le premier cas, les plantes, à cause de la grande perméabilité du sol et de sa faible faculté d'imbibition, peuvent utiliser l'eau des pluies d'été, tandis que dans le second cas, vu l'insuffisante perméabilité du sol, elles sont réduites essentiellement à l'humidité hivernale, qui représente, il est vrai, au printemps des quantités d'eau assez abondantes, mais qui s'épuise vite, l'évaporation dans de tels sols étant très forte. Comme les plantes ne peuvent utiliser suffisamment l'eau des pluies d'été, elles doivent avoir une courte existence.

Le fait de l'envahissement progressif de la steppe par la forêt n'est pas en contradiction avec la théorie de Kostytscheff que nous

venons de résumer, et voici pourquoi. La pluie tombe à dose égale sur la forêt et sur la steppe ; mais pour la neige, c'est autre chose : dans les forêts et leurs environs immédiats, elle se rassemble d'ordinaire en grande quantité, tandis que sur la steppe la hauteur de la couche de neige est déterminée par la végétation herbacée ; une grande partie de la neige est enlevée par le vent et se dépose dans les sillons et les dépressions pour de là s'écouler au printemps dans les ruisseaux et les fleuves sous forme d'eau de fonte. Aussi, le sol est-il dans les forêts et leurs environs beaucoup plus humide au printemps que dans les steppes. En outre, sur le sol des forêts s'étend la couverture morte qui empêche les herbes de croître et qui conserve au sol son humidité. C'est ainsi que se créent les conditions favorables à la végétation des arbres forestiers et que la forêt pénètre avec lenteur, mais aussi avec persévérance, dans le domaine de la steppe. Sous l'influence de la forêt, les propriétés physiques de ce sol des steppes à grain fin se modifient aussi et il acquiert bientôt toutes les qualités du sol forestier grumeleux. La forêt peut aussi du reste être installée artificiellement en enlevant les herbes et ameublissant le sol par un labour.

L'humus brut des steppes doit donc sa formation à un état physique particulier du sol ; on ne peut en douter d'après ce qui vient d'être dit. Cet état s'oppose à l'humidification du sol en été et comme, en outre, l'arrivée de l'air est restreinte par la grande finesse des particules et la saturation fréquente par l'eau des couches supérieures, l'érémacausis des débris végétaux se fait dans des conditions défavorables. L'humidité de l'hiver agit dans le même sens en diminuant par son intensité la perméabilité du sol. Dans ces conditions, l'humus s'accumule en assez grande quantité et donne au sol la couleur foncée qui lui a valu son nom de « terre noire ». Une fois cultivé et garni de plantes agricoles ou d'arbres, il passe peu à peu à une teinte grise et blanchâtre, parce qu'alors, bien humecté et bien perméable, il opère rapidement la destruction des matières humiques.

La fertilité extraordinaire de la terre noire doit être surtout attribuée à la circonstance que les matières minérales solubles formées par désagrégation sont complètement à l'abri de la lixiviation : l'eau d'infiltration existe effectivement à très faible dose dans le sol à

ÉLÉMENTS DOSÉS.	GOUVERNEMENTS								
	de Nijni-Nowgorod[1]	de Tula.	de Kursk.	de Tambow.	de Voronezh.	de Poltava.	de Saratow.	d'Orenburg.	d'Ufa.
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
Eau hygroscopique.	»	10,54	6,51	7,59	5,00	6,77	7,69	7,24	5,11
Le sol desséché contient :									
Humus	10,76	8,31	6,22	7,84	5,76	9,35	7,36	16,34	9,61
Eau combinée.	6,02	4,28	3,69	4,89	4,83	5,26	4,11	7,26	3,67
Perte au feu	16,78	12,59	9,91	12,73	10,59	14,61	11,47	23,60	13,28
Substances minérales.	83,22	87,41	90,09	87,27	89,41	85,39	88,53	76,40	86,72
dans lesquelles il y a :									
1. Substances zéolithiques :									
Silice	17,90	11,90	12,89	13,10	7,08	13,81	17,05	14,27	9,22
Alumine	6,59	6,35	6,50	7,02	2,81	10,37 (Alumine et Oxyde de fer)	11,77 (Alumine et Oxyde de fer)	7,25	7,48 (Alumine et Oxyde de fer)
Oxyde de fer	4,06	2,34	3,03	3,15	2,05			4,31	
Oxyde de manganèse	0,01	0,10	0,04	0,12	0,07	0,13	0,11	?	?
Chaux.	1,68	1,13	1,10	1,08	0,90	1,30	1,07	1,11	0,65
Magnésie.	1,10	0,60	0,60	0,37	0,55	0,70	0,60	0,71	0,85
Potasse.	1,00	0,43	0,40	0,51	0,35	0,72	0,85	0,63	0,51
Soude.	0,17	0,05	0,05	0,04	»	0,04	0,09	0,03	0,07
Acide phosphorique.	0,25	0,21	0,15	0,19	0,12	0,17	0,15	0,30	0,24
Acide sulfurique.	0,02	0,06	0,04	0,02	0,10	0,09	0,03	0,08	0,01
	31,97	23,17	24,80	25,60	14,03	27,33	31,72	28,69	19,03
2. Carbonate de chaux	»	»	»	»	»	»	»	1,33	13,48
3. Argile et sable	51,25	64,28	65,31	61,71	75,51	58,07	56,84	46,41	54,35

1. D'après C. Schmidt. Voir aussi : *Chemische Untersuchung der Ackerkrume und des Untergrundes aus acht Orten der Schwarzerderegion und ihres Grenzgebietes*, Dorpat, 1880, et : *Baltische Wochenschrift*, 1881, p. 265 et 280.

grain fin et les principes solubles sont aussitôt absorbés par le réseau très serré des racines des plantes des steppes. Ils retournent de là, pour la plus grande part, dans l'humus qu'ils contribuent à former et, quand celui-ci est soumis à la culture du sol des steppes dans des conditions favorables à la décomposition, ils profitent en forte proportion aux végétaux cultivés, d'autant plus que les matières organiques se décomposent alors très vite. Les analyses précédentes publiées par P. Kostytscheff donnent une idée de la composition chimique de la terre noire de Russie.

Les nombres ci-dessous, dus également à Kostytscheff, montrent l'extraordinaire homogénéité de composition chimique du tchernozem jusqu'à d'assez grandes profondeurs :

Terre noire du gouvernement d'Ekaterinoslav.

ÉLÉMENTS DOSÉS.	PROFONDEUR DE LA COUCHE (en pouces).						
	0-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36	36-42
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100
Eau hygroscopique. . . .	8,47	8,61	8,55	9,87	9,14	8,68	7,83
Le sol desséché contient :							
Humus	9,64	7,71	6,41	5,61	3,57	3,18	1,56
Eau combinée.	3,98	2,46	2,14	2,22	2,21	2,23	2,02
Perte au feu	13,62	10,17	8,55	7,83	5,78	5,41	3,58
Substances minérales. . .	86,38	89,83	91,45	92,17	94,22	94,59	96,42
dans lesquelles il y a :							
1. Substances zéolithiques :							
Silice	17,19	17,91	18,01	18,24	18,63	18,70	16,71
Alumine	7,29	7,64	7,81	7,89	7,95	7,90	7,02
Oxyde de fer	4,68	4,99	5,01	5,40	5,22	5,28	4,65
Oxyde de manganèse . .	0,19	0,20	0,21	0,19	0,21	0,20	0,11
Chaux.	1,52	1,38	1,41	1,38	1,44	1,46	1,77
Magnésie.	1,51	1,67	1,66	1,60	1,73	1,71	1,42
Potasse	0,70	0,78	0,77	0,80	0,82	0,81	0,72
Soude.	0,06	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,08
Acide phosphorique . .	0,21	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,15
Acide sulfurique. . . .	0,22	0,02	0,02	0,03	0,03	0,33	0,01
	33,57	34,88	35,18	35,81	36,31	36,66	32,67
2. Carbonate de chaux . . .	1,41	1,08	1,08	1,31	1,18	1,13	14,04
3. Argile et sable	54,82	53,93	54,88	55,07	56,74	57,11	49,85

Près de l'humus brut des steppes peut se ranger une autre espèce d'humus qui se forme de la même façon et qu'on peut appeler à juste titre *humus brut de vase* (*Schlammrohhumus*). En mélange avec divers éléments minéraux à grain très fin (argile, sable, marne), il forme ce qu'on nomme le limon (*Schlick*), qui se dépose sur les bords et à l'embouchure des fleuves et contribue à la formation des marais (*Marsch*). Cette sorte d'humus provient originairement de restes organiques animaux et végétaux ; les plantes et animaux aquatiques se trouvent exposés à la décomposition sur des places asséchées du lit ; lors d'une crue, ils sont transportés plus loin à l'état pulvérulent et finalement se déposent en mélange avec des matières terreuses. Le taux de ces substances organiques en humates, de même que leur mode de formation, montrent qu'elles ont pris naissance dans des conditions défectueuses de l'érémacausis. Le taux d'humus dans les sols de marais humiques s'élève à 5-10 p. 100.

L'*humus brut de bruyère* existe dans les régions où les conditions de sol et de climat sont si favorables à la végétation de la bruyère (*Calluna vulgaris*), qu'elle étouffe presque entièrement toutes les autres plantes et couvre le sol d'un tapis serré[1]. Sur les sols sablonneux, les dévastations des forêts sont la principale cause de l'invasion de la bruyère. Le vrai sable de bruyère se reconnaît à une couche de grès brun ou noir (*Ortstein*[2]) situé à une faible profondeur au-dessous de la surface. Avec la bruyère on trouve, dans certaines contrées, le genêt à balai (*Sarothamnus scoparius*), divers genêts (*Genista anglica, G. pilosa*), l'airelle myrtille (*Vaccinium myrtillus*), l'airelle canche (*Vaccinium vitis idæa*), l'ajonc (*Ulex europæus*), etc.

Les régions à bruyères sont en général caractérisées par la sécheresse du sol ; donc l'humus brut de bruyère est une variété qui se forme par la décomposition des bruyères avec défaut d'humidité. Dans les premiers stades, l'humus est de teinte sombre et de structure compacte, peu fibreuse ; plus tard, il devient brun noir ou noir,

---

1. A. Salfeld, *Die Kultur der Haideflächen Nord-West-Deutschlands*. Hildesheim, 1870, imprimerie Gerstenberg.

2. C'est notre *alios*. (Trad.)

de la consistance de la tourbe (tourbe de bruyère), très homogène, presque graisseux à l'état humide et solidement agglutiné à l'état sec.

L'*humus brut forestier* se forme aux dépens de la couverture quand, par suite de la température ou de la croissance des arbres, l'humidité diminue et l'air n'arrive plus à dose suffisante. De plus, les plantes qui s'installent de préférence sur cet humus (bruyères et airelles) contribuent, par leur réseau serré de racines et leurs détritus propres, à l'augmentation de ces dépôts[1].

Les plantes caractéristiques de l'humus brut forestier sont surtout : la bruyère (*Calluna vulgaris*), l'airelle canche (*Vaccinium vitis idæa*), l'airelle myrtille (*Vaccinium myrtillus*), le mélampyre des prés (*M. pratense*), le *Mayanthemum bifolium*, le *Trientalis europæa* dans les pays du Nord et dans les montagnes, le rhododendron dans les montagnes, les fougères (*Pteris aquilina* et diverses espèces d'aspidium), les lycopodes (*Lycopodium clavatum, L. complanatum*), diverses mousses (entre autres : *Hypnum Schreberi, H. purum, Hylocomium triquetrum, Sphagnum Girgensohnii, Leucobryum vulgare*).

Partout où commence à se former l'humus brut, la couverture morte se montre plus ou moins compacte, tandis qu'elle est poreuse là où naît le terreau. Donc déjà par l'état de la couverture on voit si l'on a affaire à l'une ou à l'autre espèce d'humus. L'humus brut forme généralement des couches assez épaisses qui, à l'état peu décomposé, constituent des masses fibreuses d'une structure moyennement poreuse et, plus tard, à mesure que l'air fait défaut, des dépôts compacts presque semblables à la tourbe (tourbe sèche)[2]. Dans le premier cas, l'humus brut est encore susceptible d'une décomposition ultérieure s'accomplissant en quelques années ; dans le second, il se montre au contraire d'une grande fixité.

---

1. E. RAMANN. *Forstliche Bodenkunde und Standortslehre*. Berlin, 1893, p. 230.

2. Il ne me paraît pas opportun de séparer, comme RAMANN l'a proposé, les dépôts désignés jusqu'ici par le nom général d'humus brut (*Rohhumus*), en deux groupes, humus brut et tourbe sèche (*Rohhumus* et *Trockentorf*), parce que cette distinction n'est pas nette et que la tourbe sèche (*Trockentorf*) procède le plus souvent de l'humus brut (*Rohhumus*).

Quant à la facilité et à la rapidité avec lesquelles progresse le dépôt d'humus brut, les détritus végétaux qui le forment présentent des différences remarquables. D'après E. RAMANN, les arbres se rangent à ce point de vue dans l'ordre suivant : hêtre, épicéa, chêne, pin. Pour le sapin, le mélèze et le bouleau, les observations manquent encore. Le même auteur cite parmi les espèces du tapis végétal : bruyère, airelle canche, airelle myrtille, fougères, mousses, surtout celles qui forment des touffes serrées. Suivant le matériel producteur, suivant le degré d'altération et les circonstances extérieures, l'humus brut présente une consistance et une couleur différentes.

L'*humus brut des prairies* provient de la décomposition des racines des graminées et autres plantes des prairies avec un accès d'air limité et un taux exagéré d'humidité dans le sol. Ce sol des prairies est difficilement perméable à l'air, parce qu'il n'est pas travaillé et qu'à cause de sa situation dans les points les plus bas du relief il jouit d'une humidité excessive. Ajoutons que le réseau radiculaire richement ramifié des plantes des prairies obstrue le plus grand nombre des pores aérifères. Par suite de cette texture du sol, la décomposition des matières organiques est très lente ; celles-ci se rassemblent peu à peu en quantité plus ou moins grande sous forme d'humus brut et contribuent d'autant, vu leur grande faculté d'imbibition, à augmenter le taux d'humidité du sol. Finalement, il arrive un moment où l'accès de l'air atteint son minimum ; alors se manifestent les réactions de la putréfaction et les matières humiques qui se déposent se rapprochent de la composition de la tourbe (tourbe de prairie). Le sol de la prairie prend alors le caractère tourbeux qui se manifeste par la disparition des graminées et par la pullulation des herbes acides (*Carex, Scirpus,* etc.) et d'autres plantes de marais.

Comme on vient de le voir, les matières de l'humus brut, quand elles sont soumises à des conditions défectueuses d'érémacausis, passent finalement à des produits très voisins de ceux de la putréfaction dont ils sont des formes de transition.

2. — Produits de la putréfaction.

L'humus formé dans les eaux stagnantes en l'absence de l'air est ordinairement d'un brun sombre ou d'un noir brun, avec une consistance variable et laisse encore aisément reconnaître la structure des plantes dont il provient. Le produit de cette humification, nommé *tourbe* ou « humus acide », se signale par une grande fixité et ne subit que des changements insignifiants quand il est soumis à des conditions favorables à la décomposition (érémacausis). On ne peut admettre que des organismes inférieurs ne participent pas à ces processus, puisque, comme on l'a montré plus haut, la transformation des matières organiques est liée, d'une manière absolument générale, à l'activité des champignons et qu'en outre les produits gazeux et solides résultant de la formation de la tourbe ont une composition analogue à ceux qui naissent dans la putréfaction des résidus végétaux. Le fait que la tourbe a des propriétés antiseptiques[1] et l'observation signalée par plusieurs auteurs[2] qu'on n'a pas trouvé de bactéries ni d'êtres organisés quelconques dans la tourbe faite ne sont pas en contradiction avec cette opinion ; car on n'a pas examiné les premiers stades de décomposition dans lesquels les microorganismes, d'après ce que nous savons des processus de la putréfaction, déploient sans aucun doute leur activité.

Plus tard, elle s'arrête dès qu'une certaine quantité d'acides organiques (acides humiques) est formée, parce qu'ils rendent difficile et finalement empêchent le développement des bactéries. C'est pour cela que la décomposition ultérieure de la matière organique se trouve en même temps entravée à un degré extraordinaire, ne s'opérant plus vraisemblablement que par des réactions purement chimiques (ulmification ou humification). Il en est de même pour l'humus brut dont la formation est liée aussi à la présence des acides humiques.

Les points où se forment sous l'eau, par la putréfaction des débris

1. Gaffky, *Archiv für klinische Chirurgie*, vol. 28, fasc. 3. — Neuber, *ibid*, vol. 27, fasc. 4, et vol. 28, fasc. 3. — C. Reinl, *Prager medicin. Wochenschrift.* 1886, n°s 13-15.

2. J.-J. Früh, *Ueber Torf und Dopplerit.* Zürich, 1883, p. 38.

végétaux, des couches plus ou moins épaisses de tourbe s'appellent des tourbières (*Moor*). Les districts ainsi couverts d'eau stagnante se trouvent partout où, à cause de l'imperméabilité du sol ou de la persistance des infiltrations, l'eau s'accumule et noie le sol d'une manière continue. Les plantes qui s'installent dans ces milieux et donnent des dépôts de tourbe par leurs touffes qui meurent chaque année sous l'eau sont différentes suivant la composition chimique et la quantité de l'eau, mais elles offrent avec leurs stations des rapports caractéristiques qu'on utilise pour la distinction des diverses tourbières. C'est surtout d'après la flore qu'on sépare les tourbières basses (*Grünlandsmoore*) et les tourbières hautes (*Hochmoore*)[1].

a) *Les tourbières infra-aquatiques.*

Ces tourbières, que Lesquereux a désignées sous le nom d'infra-aquatiques[2], s'appellent aussi tourbières basses, de vallées, de prairies, ou tourbières calcaires, tourbières à roseaux ou à cypéracées; elles se forment sur les bords et dans les environs immédiats des eaux courantes ou encore dans les cuvettes des lacs et généralement sur les rives. Elles se trouvent surtout dans les plaines basses, plus rarement dans les pays de montagnes.

La végétation y consiste essentiellement en graminées (*Phragmites communis, Glyceria spectabilis* et *aquatica*) ou en cypéracées, parmi lesquelles en remarque surtout *Carex stricta, paniculata, ampullacea, vesicaria, canescens, paradoxa*, des espèces de *Juncus* et de *Scirpus* et, en outre, des mousses (*Hypnum intermedium, giganteum, aduncum, scorpioides, stellatum, vernicosum, cordifolium, nitens,*

1. F. Sitensky, *Ueber die Torfmoore Böhmens*. Prag, 1891. — On y trouve la bibliographie complète.

Ouvrages importants :

A. Grisebach, *Ueber die Bildung des Torfes in den Emsmooren*. Göttingen, 1846. — O. Sendtner, *Die Vegetationsverhältnisse Südbayerns*. München, 1854. — F. Senft, *Die Humus-, Marsch-, Torf- und Limonitbildungen*. Leipzig, 1862. — J.-J. Früh, *loc. cit.* — H. von Post, *Landw. Jahrbücher*, vol. XVII. — E. Ramann, *Forstliche Bodenkunde*. Berlin, 1893.

2. En allemand on les appelle *Grünlandsmoore* ou *Niederungs-, Thal-, Flach-, Wiesen-, Rasen-, Kalk-, Röhricht-,* ou encore *Rohrmoore* ou *Moos* (pl. *Möser*) ou enfin *Riede*. (Trad.)

Dicranum palustre, Philonotis fontana, Gymnocybe palustris, Scapania undulata, Bryum pseudotriquetrum). A côté de ces plantes, dont les graminées, les cypéracées et les hypnées sont les plus importantes pour la formation de la tourbe, on rencontre encore beaucoup d'autres espèces dont la liste complète ne peut trouver place ici[1].

Suivant l'origine, la situation, la composition et la quantité de l'eau, les tourbières basses présentent des flores différentes. Quand elles commencent à se former, ce sont d'ordinaire les *Phragmites,* les *Typha,* les *Glyceria spectabilis* qui dominent et on les désigne sous le nom d'*Arundinetum*[2] (de *Arundo Phragmites* = *Phragmites communis*). Sont-ce les cypéracées (*Carex, Scirpus, Juncus*) qui ont surtout contribué à leur formation, on les appellera des *Caricetum,* et des *Hypnetum* si elles doivent leur principale origine aux *Hypnum* que nous venons de citer.

En général, la formation de la tourbe est due d'abord aux *Phragmites, Typha, Glyceria, Scirpus,* c'est-à-dire à des plantes qui enfoncent leurs racines sous l'eau et développent au-dessus leurs organes aériens. Quand les restes organiques se sont accumulés assez pour que la couche de tourbe s'approche de la surface, les *Carex* s'installent, végétant surtout au-dessus de l'eau et élargissant toujours peu à peu leur domaine. Les cypéracées couvrent souvent de grands espaces qui ont, en Bavière, en Souabe, en Hongrie, des noms spéciaux et qui, avec les *Phragmites,* constituent souvent les seuls points solides de la surface tremblante de la tourbière, points qui s'élèvent de 0^{m},4. En Bavière, ce sont les *Schœnus ferrugineus* et *nigricans* qui contribuent principalement à leur formation; ailleurs, c'est le *Carex stricta*. Quand les végétaux générateurs de la tourbe se répandent dans les lacs et les étangs, la surface de l'eau se rétrécit peu à peu à partir des bords jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un petit espace d'eau libre au-dessus du point le plus profond de la cuvette; celui-ci même avec le temps finit par être envahi et se couvrir de végétation.

1. On trouvera dans l'ouvrage ci-dessus cité de Sitensky une liste complète des plantes des tourbières.

2. Dans certaines régions de France, on les appelle des *roselières*. (Trad.)

Par suite de cette marche de formation de la tourbe, la partie centrale reste la plus humide et le taux d'eau de la masse diminue à mesure qu'on s'avance vers la rive, caractère qui distingue déjà extérieurement beaucoup de tourbières basses des tourbières hautes.

Dans les bas-fonds des fleuves, les tourbières se constituent surtout là où les bords sont plats et où des alluvions se sont accumulées à la suite des inondations. Avec une pente faible, les inondations ont lieu facilement; aussi, la vitesse du cours d'eau est-elle de grande importance pour la formation de la tourbe. Malheureusement, on manque, pour les fleuves, d'observations sur la pente maxima pour laquelle se forme la tourbe sur leurs bords dès qu'ils sont plats et sur la pente minima au-dessous de laquelle les rives restent sèches. D'après les observations, d'ailleurs éparses, que O. Sendtner a faites à ce sujet, on peut admettre que, dans les grands fleuves, la formation de la toube est déjà empêchée par une pente de 3,93 pour 10 000 ; dans les rivières à méandres, il faut 20,5, mais dans ces dernières la production de tourbe a encore lieu avec 17,39, tandis que, dans les grands fleuves, elle s'empare de la place avec 6,8 (Inn) et 3,01 pour 10 000 (Danube).

Quant au sens dans lequel progresse la formation de la tourbe aussi bien dans les lacs d'assez grande dimension que dans les larges cours d'eau dont la direction est nord-sud ou à peu près, il paraît, d'après les recherches de J. Klinge[1], que la direction du vent dominant est de grande importance. Cet auteur a trouvé notamment que les rivages des lacs (dans l'est des provinces baltiques, en Bavière, Salzburg) et aussi des fleuves (s'il n'y a pas de courant trop fort perpendiculaire à la direction du vent dominant et si, en outre, le fleuve a une largeur telle que le vent puisse produire des vagues assez fortes) forment d'abord des tourbières sur la rive protégée contre le vent dominant et c'est à partir de là qu'elles s'étendent. Le bord sud-ouest des lacs des provinces baltiques orientales est toujours celui qui se couvre de végétation ; le bord nord-est, quand la largeur est suffisante, est dégarni. Dans le reste de l'Europe, les rives occidentales sont préférées par la végétation côtière. Dans les

1. *Botanische Jahrbücher,* vol. XI, 1889, p. 265.

fleuves, c'est la rive à l'abri du vent qui se couvre de végétation. C'est la direction du vent dominant qui détermine toujours le sens de la marche de cette végétation. C'est pourquoi, dans les lacs, la portion de la surface qui reste libre ne se trouve pas au-dessus de la plus grande profondeur qui occupe ordinairement le milieu ; elle est toujours rejetée vers le bord exposé au vent.

Le fond des tourbières infra-aquatiques peut être de composition très diverse, siliceux, argilo-siliceux, marneux. Il est habituellement formé de dépôts vaseux contenant de l'humus, du calcaire, de l'argile ou du lehm. Dans l'Allemagne du Nord, où ces tourbières suivent partout le cours des fleuves, c'est d'ordinaire le sable, plus rarement le lehm sableux, qui en constitue le fond, recouvert d'humus vaseux. Dans le sud de la Bavière, elles reposent sur de la silice (limon glaciaire) qui est presque partout surmontée d'une couche plus ou moins épaisse de calcaire tourbeux (*alm*). En présence de telles différences dans la composition du fond des tourbières, on ne peut admettre que celui-ci ait quelque influence sur la production des plantes caractéristiques des tourbières infra-aquatiques ; les nombreuses observations faites à ce sujet montrent que *les plantes des tourbières infra-aquatiques exigent des eaux riches en éléments nutritifs, notamment en chaux; c'est là la première condition de l'apparition de la flore typique de ces tourbières.*

L'épaisseur de la couche de tourbe y est très variable ; elle atteint dans le nord de l'Allemagne 1-2 mètres, rarement 2,5-3 mètres. Il en est autrement dans le sud de la Bavière où, d'après SENDTNER, la tourbière d'Erdinger a jusqu'à $6^{m},5$ d'épaisseur et celle de Neuburg, sur les bords du Danube, offre en maints endroits des épaisseurs de $6^{m},5$ à $9^{m},5$.

b) *Les tourbières supra-aquatiques.*

Désignées aussi sous le nom de tourbières à mousses, à sphaignes, à bruyères[1], les tourbières que LESQUEREUX nomme supra-aquatiques sont les tourbières proprement dites ; elles occupent généra-

1. Les synonymes allemands donnés par WOLLNY sont les suivants : *Moos-, Sphagnum-, Haidemoore, Filze, Lohen.* (Trad.)

lement des dépressions en forme de cuvette aussi bien dans les plaines que dans les montagnes et ont souvent une grande étendue.

Dans tous les cas, elles débutent et s'étendent par des mousses nommées sphaignes, végétant à la surface de l'eau qu'elles élèvent avec elles. Déjà par là les tourbières supra-aquatiques se distinguent des autres où il n'y a pas de sphaignes. Dès que ces mousses ont pompé l'eau en excès et qu'il n'y en a plus au-dessus d'elles, il apparaît sur leur masse spongieuse diverses autres plantes caractéristiques, notamment *Calluna vulgaris, Erica tetralix, Vaccinium oxycoccos* et *uliginosum, Eriophorum vaginatum, Ledum palustre, Andromeda polifolia, Myrica gale, Drosera rotundifolia, longifolia* et *ovata,* et la tourbière en formation se complète avec quelques autres mousses (*Polytrichum strictum*).

Suivant la prédominance des espèces, la tourbière s'appelle *Sphagnetum,* ou *Eriophoretum,* ou *Sphagneto-Eriophoretum,* ou *Vaccinieto-Sphagnetum, Vaccinieto-Callunetum,* etc.

Le genre *Sphagnum* est extrêmement riche en espèces. Celles qu'on rencontre le plus souvent sont : *Sphagnum cymbifolium, cuspidatum, capillifolium, molluscum, acutifolium, medium, variabile, subsecundum, teres, cavifolium, rigidum, molle, fimbriatum, Girgensohnii.* Ces mousses sont non seulement les éléments formateurs essentiels de la plupart des tourbières, mais encore elles sont éminemment propres par leur structure à retenir l'eau[1].

La tige (fig. 46) consiste au centre en cellules allongées à parois molles, incolores, autour desquelles est un anneau de cellules ponctuées qui sont de plus en plus étroites et à parois de plus en plus épaisses vers l'extérieur.

Les cellules de la couche tégumentaire ont des parois minces, incolores et sont beaucoup plus larges que celles du centre. Ces parois présentent quelquefois de minces épaississements spiralés et sont percées de grandes ouvertures qui mettent en communication les cellules voisines. Elles ne contiennent que de l'air ou de l'eau qui y monte comme dans un appareil capillaire très actif.

---

1. J. SACHS, *Traité de botanique,* traduit par VAN TIEGHEM sur la 3e édition allemande, Paris, Savy, 1874, p. 439.

Les feuilles, insérées par une large base sur la tige et les rameaux (fig. 47), sont composées de cellules de deux sortes régulièrement disposées ; les unes grandes, larges, en losanges allongés, les autres étroites, tubuleuses, cheminant entre les premières et reliées ensemble en réseau. Les grandes cellules perdent bientôt leur contenu et paraissent incolores ; leurs parois sont munies de rubans spiralés, étroits, irréguliers, lâchement enroulés et de grandes ponctuations

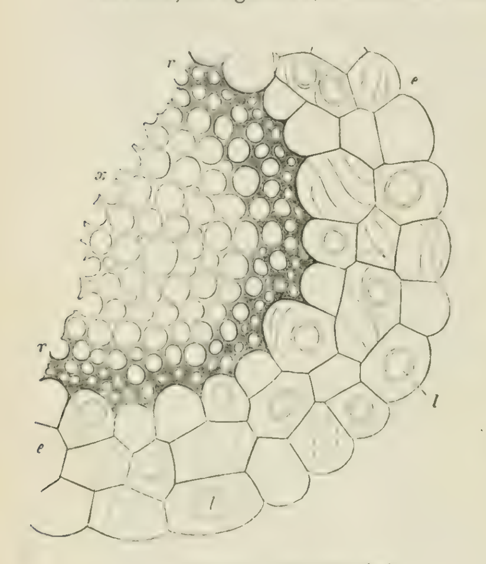


Fig. 46. — *Sphagnum cymbifolium* (90).
Section transversale de la tige : *x*, cellules intérieures à parois incolores et molles ; *r*, cellules corticales de plus en plus étroites et à parois de plus en plus épaisses et plus sombres vers l'extérieur ; *ee*, couche tégumentaire ; *l*, trous par où les cellules superposées communiquent ensemble. (D'après J. Sachs.)

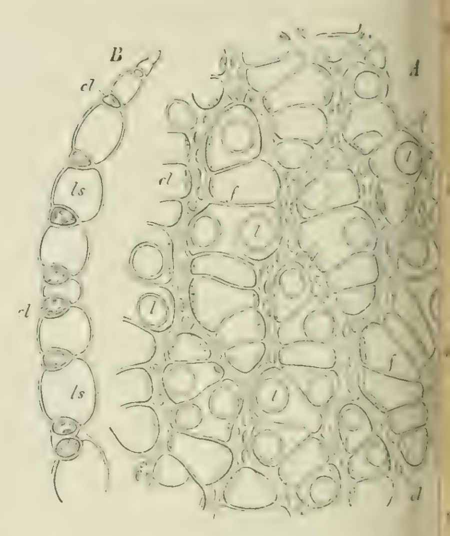


Fig. 47. — *Sphagnum acutifolium* (90).
A, une portion de la surface de la feuille vue d en l cl, cellules à chlorophylle ; *f*, les rubans spiralés : trous des grandes cellules vides. — B. Section tra sale de la feuille ; *cl*, cellules à clorophylle ; *ls*, gr cellules vides. (D'après J. Sachs.)

bordées chacune par un anneau d'épaississement et dans toute l'étendue desquelles la membrane cellulaire est bientôt résorbée. Il en résulte de grands trous, le plus souvent circulaires, dans la membrane de ces cellules incolores. Les cellules étroites situées entre les premières conservent au contraire leur contenu, forment des grains de chlorophylle et constituent ainsi le tissu nutritif de la feuille, tissu dont la surface totale est néanmoins plus faible que celle du tissu incolore et inactif (Sachs).

Grâce à la forme particulière de ces cellules perforées de la tige

et des feuilles, l'eau de la tourbière peut être pompée et amenée dans les parties supérieures de la plante. Il en résulte que les sphaignes, croissant constamment par le haut, sont humectées jusqu'au sommet comme une éponge, même quand le tapis végétal est déjà fort au-dessus du niveau de l'eau.

Les propriétés de ces mousses sont telles que, dès qu'elles apparaissent, la formation de la tourbière commence. Ce revêtement de mousses saturées d'eau est presque complètement impénétrable à l'air, si bien que les restes organiques sous-jacents sont soumis à la putréfaction. En raison de cet excès d'humidité, les sphaignes s'accroissent sur la surface de la tourbière comme une éponge gigantesque qui élève l'eau toujours plus haut et qui absorbe l'humidité atmosphérique en quantités toujours plus grandes ; cette vaste éponge s'étend sur ses bords et, dans les circonstances favorables, finit par couvrir toute la vallée.

Dans les lieux plats, la surface des tourbières est habituellement bombée, et c'est à cette propriété qu'elles doivent leur nom (*Hochmoor*). Ainsi, d'après SENDTNER, les bords de la tourbière de Murn, près de Wasserburg, sont à $7^m,3$ plus bas que le milieu, et ceux de la tourbière de Panger, près de Rosenheim, à 4,5 ou 6 mètres.

Dans l'Isergebirge, l'Erzgebirge et les monts de Bohême, il y a, d'après SITENSKY, quelques tourbières dont le centre est de 2 à 3 mètres plus élevé que les bords. GRISEBACH admet que le bombement de la grande tourbière d'Arenenburg, dans la Frise orientale, atteint environ $6^m,4$; celui de la tourbière de Düvel, près de Brême, s'élève vers le centre jusqu'à $11^m,5$. Les tourbières ont donc leur maximum d'élévation au point où elles ont commencé à se former, c'est-à-dire là où les couches de tourbe sont les plus anciennes, les plus puissantes, donc d'ordinaire en leur milieu. Ce bombement est la cause principale de leur agrandissement ; quand la couche tourbeuse a acquis une certaine épaisseur, elle presse par son propre poids sur ses bords, si bien que les limites primitives s'élargissent et qu'il se forme à la périphérie une nouvelle auréole de sphaignes. Celles-ci provoquent la formation de tourbe qui reste cependant toujours à un niveau plus bas que l'ancienne parce que celle-ci continue à s'accroître en épaisseur. Ainsi s'explique le bombement des tour-

bières et ce fait qu'elles sont souvent plus humides sur les bords qu'à l'intérieur.

Partout où agissent sans modification les facteurs extérieurs (humidité, qualité de l'eau) dont dépend la flore des tourbières, les dépôts d'humus des tourbières infra ou supra-aquatiques augmentent et, suivant les circonstances, cet accroissement de la tourbe se fait plus ou moins rapidement. Toute modification tranchée dans les conditions d'existence des plantes a, d'ordinaire, pour conséquence une interruption dans la formation de la tourbe, parce que la végétation des plantes qui la produisent s'arrête et qu'on voit apparaître d'autres espèces (des lichens ou des graminées frugales qui préparent peu à peu le sol à recevoir des végétaux plus exigeants). Ces interruptions peuvent être dues : à une sécheresse anormale longtemps prolongée, à la cessation de l'arrivée de l'eau par tarissement des sources, par correction des cours d'eau, par drainage ou encore à l'emploi de sols minéraux en couverture (pierres, sable, argile, lehm ou terre fertile). Dans ces cas, la croissance de la tourbière s'arrête, soit temporairement, soit pour toujours, suivant que les causes qui ont provoqué l'arrêt persistent ou non.

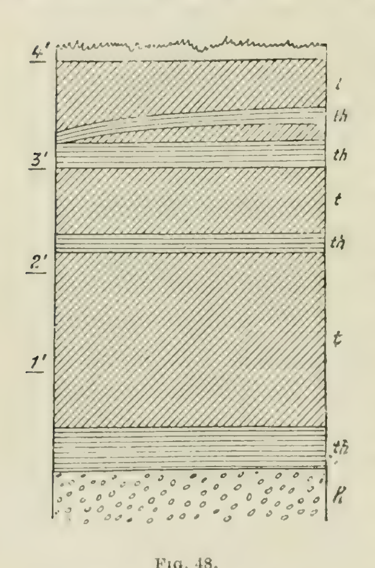


Fig. 48.

Coupe de la tourbière de Reuti : *t*, tourbe ; *th*, argile ; *k*, sable.

La tourbière infra-aquatique de Reuti, dans le sud de la Bavière, offre un exemple de ce fait ; d'après Sendtner, la tourbe y est séparée en couches d'inégale épaisseur par de nombreux lits d'argile, comme le montre la figure 48. De pareils cas sont pourtant rares, parce que d'ordinaire les modifications persistent dans le même sens.

Quand on recouvre la tourbière avec des sols minéraux ou quand l'eau fait défaut soit naturellement soit artificiellement, la formation de tourbe cesse. Sur la surface asséchée s'installent diverses herbes

acides (*Carex acuta, flacca, Juncus filiformis*) ou douces (*Aira cæspitosa, Anthoxanthum odoratum, Agrostis stolonifera, Alopecurus pratensis, Poa trivialis, Festuca pratensis*) et d'autres plantes (*Cardamine pratensis, Menyanthes trifoliata, Trifolium hybridum*, etc.) ou même, quand le sol est très sec, des mousses (*Bryum cæspititium* et *intermedium*) en nombreux petits amas recouvrant toute la surface. Entre les paquets de sphaignes flétries on voit des lichens, surtout des cladonia (*Cl. furcata, fimbriata, ochrochlora, macilenta, uncinata* et, dans les montagnes, en outre, *Cl. bellidiflora, Floerkeana, deformis*), d'abord à l'état disséminé, puis en quantités assez grandes. Quand la persistance de l'assèchement amène une diminution constante des végétaux précédents, la surface est envahie par les *Cladonia rangiferina* et *rangiformis*. On voit aussi par place *Pogonatum aloides, nanum, Pteris aquilina, Calamagrostis epigeios*. Les restes de ces plantes se décomposent souvent en compagnie de ceux de la bruyère en formant une masse terreuse feutrée, presque semblable à de la sciure et d'une teinte qui varie du blanc gris au jaune brun. A l'air, cette masse se transforme en un humus poudreux, d'un brun noir, contenant beaucoup de résine gluante, et que les Allemands appellent *Bunkerde* ou *Schollerde*. Sur cette couche épaisse de 15 à 45 centimètres on voit apparaître d'abord des graminées peu exigeantes (*Phleum pratense, Anthoxanthum odoratum, Holcus lanatus*) et plus tard des espèces moins frugales (graminées et papilionacées) quand le sol s'est amélioré.

Tandis que la prospérité des plantes formatrices est liée dans les tourbières infra-aquatiques à la présence d'eau riche en principes nutritifs, d'eau calcaire, celle des plantes des tourbières supra-aquatiques exige une eau pauvre en chaux. Les premières, en d'autres termes, ont besoin d'eau *tellurique*, les secondes d'eau *atmosphérique* provenant des pluies ou des neiges. C'est cette différence dans la composition de l'eau qui entraîne celle des deux groupes caractéristiques des végétaux des tourbières. L'opinion de Sendtner, que la base minéralogique des tourbières détermine leur formation et que les tourbières supra-aquatiques ne peuvent naître que sur l'argile, est en contradiction avec ce fait que maintes tourbières ont un sous-sol calcaire ou siliceux. D'après les recherches concordantes

de Pokorny, Früh, Lorenz, Sitensky et Ramann, la majorité des tourbières supra-aquatiques provient de prairies tourbeuses ou de dépôts d'humus, notamment dans les forêts. On a souvent observé qu'elles peuvent prendre naissance directement sur l'argile, donc sur des dépôts inorganiques; mais c'est parce que l'eau de pluie reste stagnante sur ces couches argileuses imperméables et que les sphaignes s'y installent, en formant de la tourbe, comme on peut s'en convaincre dans les vieux fossés argileux remplis d'eau de pluie. Le plus souvent, le fond consiste en une couche d'humus produite par la flore d'une tourbière infra-aquatique ou par des arbres forestiers et qui se dépose aussi bien sur l'argile que sur divers autres sols minéraux (lehm, marne, sable).

Une tourbière à sphaignes peut se former sur une tourbière infra-aquatique si la composition de l'eau se modifie; qu'une tourbière de ce dernier type acquière toute l'épaisseur qu'elle peut avoir dans les conditions données, ou que, pour une cause quelconque, l'apport d'eau tellurique soit diminué, ou bien encore que cette eau s'appauvrisse par son épuisement plus ou moins complet en matières nutritives, surtout en chaux, sous l'influence des plantes de marais, l'accroissement de la tourbière prendra fin. Si, dès lors, il se forme dans les dépressions des accumulations d'eau atmosphérique, sur ce fond humique, très aqueux, les conditions deviennent favorables à l'apparition des végétaux qui donnent les tourbières à sphaignes, par exemple : *Sphagnum rigidum, verum, compactum, acutifolium,* etc., et d'autres mousses.

Ces tourbières peuvent aussi se former dans les forêts de façons diverses, soit directement, soit après une phase de flore des prairies tourbeuses. Dans le premier cas, la production de la tourbe est souvent occasionnée par une couche d'alios interstratifiée dans le sous-sol[1]. L'alios qui se forme dans les forêts sous l'influence de l'humus brut provoque, par son imperméabilité, l'accumulation de grandes quantités d'eau pendant la saison humide; les arbres végètent moins bien et meurent peu à peu. Le sol reçoit plus de lumière et de chaleur, ce qui active la décomposition d'une partie de l'humus

1. E. Ramann, *Forstliche Bodenkunde,* Berlin, 1893, p. 218.

accumulé et favorise la végétation de la bruyère qui supplante les mousses. Les couches d'humus de bruyère s'accroissent constamment en épaisseur et comme, vu leur grande faculté d'imbibition, elles sont très humides, elles permettent l'arrivée de plantes telles que l'*Erica tetralix,* l'*Eriophorum vaginatum,* le *Scirpus cæspitosus* qui font de larges emprunts à la provision d'eau du sol. Ces plantes font reculer les bruyères sur les bords moins mouilleux de la tourbière et y forment des couches de tourbe. « Elles ne restent pas longtemps en possession incontestée du domaine. D'abord, en certains points, qui vont s'élargissant, apparaissent des sphaignes et, de même que la forêt primitive a été supplantée par les bruyères, celles-ci ont été plus tard supplantées par les *Eriophorum,* lesquels ont été toujours plus acculés sur les bords par les mousses de tourbières. » Dans toutes les tourbières de ce type on trouve donc, en allant des bords vers le centre, toutes les plantes qui prennent part à la formation de la tourbe et justement dans l'ordre de leur apparition (bruyère, *Erica tetralix, Eriophorum vaginatum, Sphagnum*). La figure 49 donne une coupe d'une tourbière de cette origine.



Fig. 49. — Tourbière d'origine forestière (D'après E. Ramann).
a, tourbe de sphagnum ; *b*, tourbe d'eriophorum ; *c*, tourbe de bruyère ; *d*, restes d'arbres et matières organiques indéterminées ; *e*, sol minéral.

A mesure que décroît pour les plantes, avec le gonflement de la couche de tourbe, la faculté d'absorber l'eau qui leur est nécessaire, la bruyère fait invasion de nouveau et la tourbière marche vers une fin certaine. C'est ainsi que se termine presque toujours la formation des tourbières dans les vallées, comme l'ont montré les recherches de P.-E. Müller[1], D. Emeis[2] et A. Borgmann[3]. Les tour-

1. *Études sur les formes naturelles de l'humus.* Berlin, 1887. Traduit dans les *Annales de la Science agronomique française et étrangère,* 1889, t. I.

2. *Allgemeines über Wald, Moor, und Haide in Schleswig-Holstein.* Berlin, 1873.

3. *De Hoogvenen van Nederland. Inaug.-Dissertationen.* Groningen, 1890. *Referat in : Forschungen, etc.,* vol. XIV, 1891, p. 274.

bières où il n'y a pas de restes d'arbres ont, comme sous-sol, un *Callunetum* ou, en son absence, un *Eriophoretum*.

En montagne, la production des tourbières à sphaignes aux dépens des forêts est favorisée par cette circonstance que, sur les plateaux et les pentes, il se forme très facilement de puissantes couches d'humus brut sur lesquelles se fixent les mousses des tourbières (d'abord le *Sphagnum acutifolium*) et ces mousses constituent peu à peu une tourbière à sphaignes.

Celles qui prennent naissance dans les forêts par le second mode, c'est-à-dire qui ont pour sous-sol une prairie tourbeuse, sont beaucoup plus rares que les précédentes. Elles ont été observées, par exemple, dans des endroits peuplés d'aunes et de saules et qui possèdent une humidité suffisante. Ici peuvent se montrer diverses espèces d'hypnum, de cypéracées et d'équisétacées qui, par leur présence en masse, augmentent l'humidité de ces places et facilitent le déracinement des arbres par le vent. « Ou bien la formation tourbeuse, partant de cuvettes, de fossés aqueux généralement garnis d'*Equisetum limosum, Juncus communis, Sphagnum* et autres plantes, s'étend aux environs dans la forêt sur l'humus humide et empêche les arbres de prospérer. Dans le cours des années, les tiges des arbres déracinés et tombés se sont transformées partiellement ou totalement en humus qui enrichit la tourbière et la rend particulièrement propre à la croissance des mousses de la tourbe. » (SITENSKY.)

L'épaisseur de la couche de tourbe dans les tourbières à sphaignes est assez considérable. Ainsi, aux environs d'Ems, la tourbière de Papenburg atteint une profondeur de 7^{m},5 à 9^{m},4 et celle d'Aurich de 8 mètres à 11^{m},5. Dans le sud de la Bavière, quelques tourbières ont, suivent SENDTNER, une épaisseur de 8 mètres et plus. En Lithuanie, EISELEN affirme que certaines tourbières présentent des couches de tourbe de 10 mètres à 11^{m},3 tandis que celles de l'Allemagne du Nord ont, en moyenne, d'après le même auteur, 4 à 8 mètres d'épaisseur. D'après LESQUEREUX, les tourbières du Jura ont des couches de tourbe épaisses de 9^{m},5 à 13 mètres[1].

---

1. F. SENFT, *Die Humus-, Marsch-, Torf- und Limonitbildungen*, Leipzig, 1862, p. 104.

En comparant ces données avec ce qui vient d'être dit sur les tourbières infra-aquatiques, on voit que les couches de tourbe dans les tourbières à sphaignes sont, en général, plus épaisses. En outre, la tourbe présente dans les deux groupes de tourbières de grandes différences, soit dans l'ensemble, soit dans chaque couche. Tandis que dans les tourbières infra-aquatiques elle est toujours poudreuse et d'un noir pur de haut en bas, dans les tourbières à sphaignes elle apparaît, à la surface, comme une masse jaunâtre laissant distinguer les restes des végétaux ; elle devient d'un brun jaune ou d'un brun rouge jusqu'à une profondeur de $1^m,2$ à $1^m,6$, puis commence une couche plus compacte, de 3 à 4 mètres d'épaisseur, qui devient plus dense et plus foncée à mesure qu'on s'enfonce et qui, à 6 mètres, prend une structure terreuse complètement amorphe et une coloration noir brun.

c) *Tourbières mixtes.*

Il peut y en avoir de diverses sortes, soit que les tourbières précédemment décrites coexistent sur une même surface, soit que les masses tourbeuses aient un caractère indéterminé.

On appelle tourbières mixtes (*Mischmoore*) celles où des espaces ou îlots plus du moins grands présentent une flore différente de celle de la portion principale.

Ainsi, d'après SENDTNER, il y a dans le sud de la Bavière des tourbières à sphaignes qui entourent des îlots de tourbières infra-aquatiques ou, au contraire, des tourbières de cette dernière sorte montrent sur certains points des sphaignes. Cela peut être dû à des différences dans la composition de l'eau.

SITENSKY distingue deux sortes de formations tourbeuses à caractères mélangés. Il a trouvé l'une aux points de contact d'une tourbière à sphaigne et d'une tourbière infra-aquatique et la considère comme une formation de passage, telle qu'on en voit sur lesdites tourbières quand les circonstances favorisent l'installation de la flore des tourbières à sphaignes. Ces modifications se constatent dans un seul et même marais, qui peut présenter ici de la tourbe infra-aquatique avec début de tourbe à sphaignes et ailleurs le type parfait de la tourbière infra-aquatique.

La seconde sorte de formations tourbeuses indéterminées comprend les marais (*Erlbrüche*) avec eau stagnante de faible profondeur qui se trouvent dans le voisinage des étangs ou des eaux courantes sur fond de sable, de lehm, de marne ou de tourbe près des tourbières infra ou supra-aquatiques. Ces marais (*Erlbrüche*), par l'état de la végétation, sont tout semblables aux tourbières. Suivant la composition du sous-sol, on distingue les marais tourbeux à fond de tourbe, de sable, de lehm et de marne. A cause du taux élevé d'oxygène de l'eau, l'humus acide ne s'y forme d'ordinaire qu'en faible proportion. C'est ce qui fait qu'autrefois on désignait ces marais sous le nom de tourbières douces par opposition aux tourbières acides (E. Ramann).

d) *Tourbe de vase.*

La tourbe de vase (*Schlammtorf*) provient de restes de plantes ou d'animaux se déposant dans des eaux stagnantes ou à cours lent, pauvres en oxygène et en principes minéraux solubles. On peut, d'après les éléments constituants, distinguer la vase siliceuse, la vase argileuse, etc. Les matières organiques qu'elle renferme ont perdu généralement leur structure et ont une teinte rouge brun ou noir brun.

CHAPITRE III

PROPRIETÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES HUMUS

1. — Propriétés chimiques.

L'humus renferme les mêmes éléments que les restes des plantes et des animaux qui l'ont formé, mais dans des proportions qui varient avec le degré et les agents extérieurs de la décomposition. Dans le cours de ses transformations incessantes, il produit une substance qui n'a pas de composition stable et n'est même pas un mélange de combinaisons chimiques définies ; c'est un complexe de produits de décomposition en train de s'altérer et encore insuffisamment définis. Tous les efforts faits jusqu'alors pour isoler de l'humus des combinaisons définies ont plus ou moins échoué. C'est notamment le cas pour les travaux de G. J. MULDER[1], qui a étudié avec le plus de soin les éléments de l'humus. Ils n'ont de commun que leurs caractères physiques et quelques propriétés chimiques.

a) *Éléments organiques de l'humus.*

Ils consistent, d'après MULDER : en *ulmine* et *acide ulmique*, éléments caractéristiques de l'humus brun, se formant aux dépens des matières organiques dès le début de l'érémacausis et de la putréfaction ; en *humine* et *acide humique*, parties essentielles de l'humus noir, indiquant le point culminant de l'humification et se produisant surtout en présence de l'air ; enfin en *acide crénique* (incolore) et *apocrénique* (variant du jaune au brun), qui provien-

1. G. J. MULDER, *Die Chemie der Ackerkrume*. Berlin, 1861, I, p. 308-364.

nent de l'oxydation ultérieure de l'humine et de l'acide humique et peuvent se transformer directement en combinaisons inorganiques.

Voici, d'après MULDER et W. DETMER[1], la composition élémentaire de ces divers corps :

Taux p. 100 de la substance sèche, cendres déduites.

	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE.	AZOTE.
Ulmine de tourbe brune (DETMER).	52.14	7.03	40.19	0.64
Ulmine et acide ulmique fabriqués artificiellement à l'aide de sucre (STEIN)	63.1	4.7	33.2	0
Acide ulmique de sucre (MULDER).	67.1	4.2	28.7	0
Acide ulmique d'une vieille écorce de quinquina (HESSE).	59.4	6.1	31.0	3.5
Humine et acide humique de sucre (MULDER).	63.4-64.4	4.3	31.3-32.3	0
Humine de tourbe noire (DETMER).	55.23	6.31	37.45	1.01
Acide humique de tourbe noire et de sol arable. Moyenne (DETMER).	59.74	4.48	35.78	0
Acide humique de divers sols de jardins et de champs (DETMER).	56.3-57.9	4.4-5.1	32.4-36.0	3.3-3.6
Acide crénique d'une terre arable (MULDER).	44.0-44.7	5.4-5.5	46.6-48.0	1.9-3.9
Crénate d'ammoniaque d'une terre arable (MULDER).	47.2-50.9	3.8-4.2	41.9-47.5	1.5-4.1

De l'examen de ces chiffres il ressort qu'on n'est pas encore arrivé à obtenir les divers éléments de l'humus à l'état chimiquement pur ; on ne peut donc les caractériser d'après leur composition. Mais on voit par les analyses précédentes qu'ils sont plus riches en carbone que les hydrates de carbone et que leur taux d'hydrogène est à peu près celui qui existe dans l'eau. Ils peuvent dès lors être envisagés comme des hydrates de carbone fortement déshydratés ; cette opinion est corroborée par ce fait qu'on peut,

1. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XIV, 1871.

en partant des hydrates de carbone, préparer, à l'aide d'acides très avides d'eau, des substances artificielles très voisines des éléments de l'humus.

L'augmentation du carbone et la diminution de l'hydrogène et de l'oxygène dans la formation de l'humus se constatent aisément quand on compare la composition centésimale d'un hydrate de carbone tel que la cellulose avec celle des éléments de l'humus, comme on le fait dans le tableau suivant emprunté à DETMER :

	CELLULOSE.	HUMINE et acide humique.
	—	—
Carbone	44.444	59.74
Hydrogène	6.173	4.48
Oxygène	49.383	35.78

Les chiffres suivants obtenus par WILL et MEYER[1] fournissent un autre exemple :

	BOIS DE CHÊNE.	BOIS DE CHÊNE DÉCOMPOSÉ.	
		Brun clair.	Brun foncé.
	—	—	—
Carbone	50.6	53.6	56.2
Hydrogène	6.0	5.2	4.9
Oxygène et azote	43.4	41.2	38.9

Ces analyses montrent que dans l'humification le taux du carbone augmente, tandis que celui de l'hydrogène et de l'oxygène diminue.

Remarquons aussi que les humus naturels contiennent de l'azote. On ne sait encore si cet azote entre dans la constitution des corps humiques, mais il est connu qu'une partie provient de l'ammoniaque combinée avec les acides de l'humus, qu'une autre plus importante appartient à des matières azotées inconnues (amides ?[2]) qui se for-

1. *Archiv der Pharmacie,* IIe série, vol. LXX, 273. — *Pharm. Centralblatt,* 1852, p. 522.

2. A. BAUMANN (*Ueber die Bestimmung des im Boden enthaltenen Ammoniakstickstoffs und über die Menge des assimilirbaren Stickstoffs im unbearbeiteten Boden. Habilitationschrift,* 1886) a montré qu'en traitant le sol à froid avec une lessive de soude ou à chaud avec de l'acide chlorhydrique, la quantité d'ammoniaque obtenue dépasse souvent le taux réel d'ammoniaque du sol.

ment aux dépens des éléments azotés des déchets animaux et végétaux. Cet azote de l'humus est sous une forme difficilement assimilable qui, d'après A. Mayer, est probablement semblable à celle de l'azote des lignites et des houilles. Suivant une autre opinion, beaucoup des principes albuminoïdes des plantes sont à comparer pour l'inaltérabilité à la corne des animaux et sont encore protégés par leur mélange avec les acides de l'humus, qui ont beaucoup de ressemblance avec les tannins. La résistance à la décomposition d'une partie des éléments azotés de l'humus est attribuée par quelques auteurs (H. von Post[1] et P. E. Muller[2]) à ce que les nombreux insectes qui en vivaient laissent à leur mort dans l'humus les parties chitineuses de leur corps, et on sait que la chitine est rebelle à la décomposition. Cette manière de voir est très plausible, car le taux de chitine peut être assez élevé dans certains humus (humus brut forestier, tourbe[3]). Dernièrement P. Kostytscheff[4] a montré que beaucoup des éléments azotés des matières soumises à la décomposition étaient utilisés par les myriades d'organismes inférieurs (bactéries, champignons) qui se nourrissent des principes albuminoïdes et de l'ammoniaque et les emploient à former leurs tissus. Jusqu'à quel point ces diverses opinions correspondent-elles à la réalité, c'est à quoi l'on ne peut répondre avec certitude pour le moment. Pour notre but, il suffit d'avoir prouvé que les éléments azotés de l'humus se trouvent en grande partie sous une forme peu soluble. (Voir *Note E.*)

Depuis que W. Detmer a établi que l'ulmine, l'humine et leurs acides correspondants montrent une grande concordance dans leur composition et leurs propriétés, on sépare les éléments organiques de l'humus en deux groupes, suivant leur réaction vis-à-vis des alcalis : les uns, insolubles dans les solutions alcalines, se transforment peu à peu en acides de l'humus : ce sont les matières humi-

---

1. *Landw. Jahrbücher*, 1888, p. 405.

2. *Studien über die natürlichen Humusformen*. Berlin, 1887, p. 173.

3. V. Post appelle ces humus *coprogènes*, par opposition aux humus végétaux ordinaires.

4. *Annales agronomiques*, t. XVII, 1891, p. 17-38.

ques (*Humusstoffe*) ; les autres, facilement solubles dans les alcalis, peuvent être séparés de leurs dissolutions par des acides minéraux plus énergiques : ce sont les acides de l'humus (*Humussäure*).

Les matières humiques (ou humus indifférent : humine et ulmine) sont des composés dont la teinte va du brun au noir, qui sont insolubles dans les milieux les plus divers, se gonflent dans les liqueurs alcalines et ne possèdent aucune propriété chimique saillante.

Les acides de l'humus[1] sont plus ou moins solubles dans l'eau pure et dans les acides faibles (phosphorique, borique), mais ils sont insolubles dans l'eau salée ou contenant de l'acide chlorhydrique et sulfurique.

Ils forment avec les terres alcalines (chaux, magnésie), avec les oxydes de fer et de manganèse et les oxydules correspondants, comme avec l'alumine, des combinaisons[2] appelées humates, insolubles dans l'eau et dans les solutions alcalines moyennement concentrées, mais qui se redissolvent en présence soit d'un excès d'acides, soit de carbonates alcalins. L'humate de chaux humide se décompose plus vite que l'acide humique pur (voir p. 190) en donnant du carbonate de chaux. Celui-ci peut alors se combiner avec de nouvelles quantités d'acides de l'humus. C'est sur cette propriété que repose surtout l'active décomposition des matières humiques dans les sols riches en terres alcalines. L'insolubilité de l'humate de chaux explique la clarté des eaux calcaires qui sont en contact avec des sols humiques.

Les acides de l'humus forment avec les alcalis (ammoniaque, potasse, soude) des combinaisons solubles dans l'eau, comme le prouve la couleur brune[3] des eaux qui traversent des tourbières

---

1. C. G. Eggertz, *Studien und Untersuchungen über die Humuskörper der Acker- und Moorerde. Meddelanden fran konigl. Landbruks-Akademiens-Experimentalfält*, n° 3. Stockholm, 1888, p. 1-66. — Biedermann's *Centralblatt für Agrikulturchemie*, 1889, p. 75.

2. D'après Mulder, il se forme alors des humates doubles d'alcali et de chaux, magnésie, oxyde de fer, oxydule de fer et de manganèse ou d'alumine (*Chemie der Ackerkrume*, I, p. 333).

3. Ce n'est pas toujours le cas, la teinte brune pouvant provenir aussi de la dissolution de l'acide humique pur.

ou d'autres sols riches en matière organique. Dans ces solutions alcalines, les acides minéraux forts produisent un précipité volumineux qui se réduit beaucoup par la dessiccation et donne un produit amorphe, brun, difficilement soluble dans l'eau. Les acides faibles (carbonique, borique) ne donnent aucun précipité.

Les réactions des acides de l'humus sur les alcalis et des humates alcalins sur les acides minéraux rendent possible leur extraction soit du sol, soit de toute matière contenant de l'humus. La méthode employée par L. Grandeau[1], méthode par laquelle il extrait du sol une substance appelée *matière noire*, importante à plusieurs points de vue pour la fertilité des sols, consiste à traiter la masse humique par l'acide chlorhydrique étendu pour mettre en liberté la chaux avec laquelle sont le plus souvent combinés les acides de l'humus et, après l'avoir lavée à l'eau distillée, à extraire la matière noire par l'ammoniaque diluée. La solution, évaporée à sec, donne une masse charbonneuse noire qui est la matière noire.

D'après les recherches de C. G. Eggertz, ce résidu se dissout presque entièrement dans le carbonate ou oxalate ou phosphate d'ammoniaque, ainsi que dans le carbonate de potasse ou de soude, mais pas dans le chlorure d'ammonium, le nitrate et le sulfate d'ammoniaque, ni dans le sulfate ou phosphate de potasse. Avec une solution de chlorure de calcium ammoniacal, les dissolutions des acides de l'humus donnent des dépôts complètement insolubles dans l'eau et les alcalis caustiques, mais solubles en partie dans le chlorure d'ammonium, mieux dans le nitrate et mieux encore dans le sulfate d'ammoniaque. Les dépôts de chaux sont détruits par l'oxalate et le carbonate d'ammoniaque, le carbonate de soude et le sulfate de potasse, avec formation d'un composé soluble d'humus et d'alcali. L'humate de chaux est dissous par le phosphate d'ammoniaque en une solution brune sans qu'il y ait de précipité de phosphate de chaux.

L'acide obtenu de l'humus par précipitation avec les acides minéraux contient toujours de l'azote, même quand il est à nouveau

---

1. Recherches sur le rôle des matières organiques du sol dans les phénomènes de la nutrition des plantes. (*Annales de la Station agronomique de l'Est,* 1872.)

lissous dans l'alcali et reprécipité par les acides. Il subit ainsi, il est vrai, une décomposition partielle, mais l'azote ne s'en sépare pas, car les nouveaux précipités sont toujours plus riches en azote que les matières dont ils proviennent.

Même après une distillation de 4 heures et demie, avec une lessive de soude, tout l'azote n'a pas été chassé, d'après les essais d'EGGERTZ. Dans 8 échantillons contenant de 5.80 p. 100 à 10.70 p. 100 d'azote, il en est resté de 2.12 p. 100 à 5.30 p. 100.

Les précipités renfermaient toujours, en outre, des principes fixes qu'on doit considérer comme faisant partie intégrante du complexe organique. C'est le cas pour le soufre, le phosphore, le fer et aussi pour l'alumine et la silice, comme EGGERTZ l'a prouvé.

La composition des 13 précipités qu'il a analysés variait comme il suit :

Carbone	40.86-56.18	p. 100
Hydrogène	4.33- 6.63	—
Oxygène	25.09-37.98	—
Azote	2.59- 6.43	—
Silice	0.37-10.47	—
Phosphore	0.15- 7.58	—
Soufre.	0.55- 2.09	—
Alumine et oxyde de fer	0.38- 3.90	—

Il est important, sous plusieurs rapports, de noter que l'acide humique est à ranger parmi les substances colloïdales. Ceci ne résulte pas seulement de sa manière d'être vis-à-vis des solutions nutritives (voir p. 327), mais encore des modifications que ses dissolutions subissent par congélation. Dans ce dernier cas, l'acide humique se sépare de ses dissolutions sous forme d'une poudre de teinte foncée qui ne se dissout plus que très difficilement[1].

Il est donc très vraisemblable que les acides de l'humus se comportent dans l'eau comme l'empois d'amidon, comme la silice gélatineuse, etc., ce qui n'exclut pas pour eux la possibilité de former

1. Il est difficile de déterminer si ce processus joue un rôle important dans la formation des marais tourbeux, comme on l'a souvent soutenu.

des sels, ainsi qu'il arrive pour d'autres acides se gonflant en gelée à l'état libre (silice, acide stannique).

Parmi les éléments organiques de l'humus, il faut enfin signaler les principes cireux et résineux qu'on trouve dans tous les dépôts d'humus, en quantité très variable d'ailleurs. C'est l'humus doux qui en renferme le moins, puis vient l'humus brut, et ce sont les tourbes qui en contiennent le plus, jusqu'au delà de 20 p. 100.

Dans la tourbe de Dachau-Schleissheimer, près Munich, j'ai trouvé 5 p. 100 de principes solubles dans l'alcool et l'éther.

D'autres recherches[1] ont fourni les quantités suivantes :

	PRINCIPES		RÉSINE.
	cireux.	résineux.	
	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Tourbe amorphe noire (BERGSMA)	1.80	3.96	—
Tourbe en exploitation de Hagenbruck (WIEGMANN)	6.20	4.80	9
Tourbe de débourbage de Hagenbruck (WIEGMANN)	0.25	0.43	2.25

G. J. MULDER[2] a obtenu les résines d'une tourbe de la Frise en la traitant par l'alcool bouillant après l'avoir épuisée par l'eau. Par refroidissement il se déposait une poudre d'un blanc brunâtre. De deux autres principes restant dissous dans l'alcool, l'un, de couleur noire, se combinait avec l'oxyde de plomb et l'autre, d'un vert sale, ne s'y combinait pas. Enfin, on obtint de la tourbe déjà épuisée par l'alcool une quatrième résine d'une teinte brun foncé en la traitant par le pétrole. GREBE a montré qu'on obtenait souvent aussi de notables quantités de ces substances dans les sols de sable.

On ne sait rien sur la formation de ces principes cireux et résineux. Il est probable qu'ils proviennent en plus ou moins grande partie des plantes génératrices de l'humus. Ils influent grandement

1. F. SENFT, *Die Humus-, Marsch-, Torf- und Limonitbildungen*. Leipzig, 1862, p. 135.

2. ERDMANN's *Journ. fur praktische Chemie,* vol. XVI, 1839, p. 495, et vol. XVII, p. 444.

sur les modifications que subissent les matières humiques, en ce sens qu'ils ralentissent notablement la décomposition, ainsi qu'on l'a vu plus haut. (Voir p. 159.)

b) *Éléments minéraux de l'humus.*

Tout humus naturel renferme, à côté des principes organiques ou combustibles, une certaine proportion de matières minérales ou fixes provenant des plantes qui l'ont formé. A mesure que la matière se volatilise, elle devient naturellement plus riche en principes minéraux, en admettant que les précipitations atmosphériques n'en dissolvent pas une partie. Les recherches faites jusqu'alors ne permettent pas d'apprécier exactement dans quelle proportion le fait se produit, parce que, d'après la composition centésimale de la matière, soit fraîche, soit décomposée, on ne peut évaluer la perte absolue due au phénomène dont il s'agit. Elles montrent seulement que, parmi les éléments des cendres, c'est la potasse, la magnésie et l'acide sulfurique qui se dissolvent en plus grande proportion, la chaux et l'acide phosphorique beaucoup moins ; le fer et la silice résistent le mieux à la lixiviation [1].

Diverses circonstances extérieures, telles que le processus de la décomposition, la nature du sol, la situation, le climat, influent sur cette perte par dissolution. Partout où les matières organiques sont soumises à une décomposition intense, la perte en principes minéraux est nécessairement très forte, puisque les éléments des cendres passent à l'état soluble proportionnellement à la volatilisation de la matière organique. Si les conditions de décomposition sont défavorables, plus faible est la diminution des principes minéraux, leur passage à l'état soluble se trouvant entravé dans la même mesure que la décomposition, et sûrement ils atteindront leur maximum là où domine la putréfaction, là où les matières organiques ne s'altèrent qu'avec une extrême lenteur. Il va de soi que la perméabilité du sol,

1. J. Schröder, *Forstchemische und Pflanzen physiologische Untersuchungen.* Dresden, 1898. — E. Ebermayer, *Die gesammte Lehre der Waldstreu.* Berlin, 1876, p. 277. — E. Ramann, *Forstliche Bodenkunde.* Berlin, 1893, p. 276.

les conditions du ruissellement, l'intensité et la répartition des précipitations atmosphériques exercent une grande influence sur la dissolution des éléments minéraux de l'humus.

c) *Composition des dépôts naturels d'humus.*

Elle varie beaucoup suivant la matière qui les donne et les agents extérieurs de la décomposition. L'extraordinaire pénurie d'analyses ne permet d'établir à cet égard que quelques données générales qui peuvent se résumer comme il suit :

Toutes choses égales d'ailleurs, le rapport entre les combinaisons solubles dans les alcalis et l'humus dit indifférent dépend des conditions extérieures de la décomposition. On peut admettre en général que *le terreau renferme le moins d'acide, l'humus brut déjà plus et que la tourbe est la plus riche. Plus est intense l'intervention des facteurs favorables à la décomposition* (*air, humidité, chaleur, agents chimiques*), *plus la matière se transforme facilement en combinaisons chimiques simples et en éléments nutritifs assimilables pour les végétaux.* C'est pourquoi le *terreau* (*Mull*) disparaît peu à peu plus ou moins complètement, la matière organique se volatilisant en acide carbonique, eau, ammoniaque (puis acide nitrique), tandis que les principes minéraux passent à un état facilement assimilable. Il ne se produit donc pas, avec cette sorte d'humus, dans ces circonstances favorables, d'accumulations importantes de détritus. L'humus brut se décompose plus difficilement en combinaisons solubles et volatiles, aussi produit-il déjà des dépôts trop considérables. C'est dans la tourbe que la volatilisation de la matière organique est la plus faible ainsi que la transformation des principes minéraux en éléments solubles; la tourbe est la forme d'humus la plus rebelle à l'altération. Les quantités d'azote et de principes minéraux qui y sont contenues se transforment très difficilement, même dans le cas où la tourbe est soumise aux conditions les plus favorables.

L'état de l'azote dans les divers humus est particulièrement caractéristique et important sous plus d'un rapport ; il dépend des circonstances extérieures. Tandis que, sous l'influence de doses

suffisantes d'air, d'eau et de chaleur, l'azote des détritus animaux et végétaux se transforme presque entièrement en ammoniaque et acide nitrique, il s'accumule en partie sous forme de combinaisons difficilement transformables, encore inconnues pour la plupart, dès que l'un des facteurs de l'érémacausis atteint un minimum, c'est-à-dire agit avec une intensité insuffisante pour une décomposition complète. Les recherches de E. W. HILGARD[1] sont un éclatant exemple de ce fait ; la matière noire des sols de la région aride est incomparablement plus riche en azote que celle de la zone humide, comme le montrent les chiffres suivants :

SOLS DE CALIFORNIE.	TAUX D'AZOTE pour 100 d'humus.
Région humide	5.24
Région aride (plaines)	10.03
Région aride (collines)	15.87

Au premier coup d'œil, ces chiffres accusent une différence extraordinaire dans le taux d'azote de l'humus suivant le degré d'humidité du sol. Quand le taux d'azote dans les sols humides types varie de 3 à 6 p. 100 pour atteindre en moyenne 5 p. 100, le taux dans l'humus des sols arides s'élève entre 12.5 et 19 p. 100, arrivant en moyenne aux environs de 16 p. 100. Donc le rapport entre les taux moyens de l'azote de l'humus des sols des deux régions est d'environ 1/3. Exceptionnellement, il est de 1/6 et les chiffres maxima pour les humus arides dépassent même le taux d'azote des matières protéiques.

Le manque de chaleur a autant d'influence sur le taux d'azote de l'humus que le manque d'eau. Mais c'est le défaut d'air qui semble agir, de la manière la plus saisissante, sur l'enrichissement en azote des produits de décomposition ; car, de tous les humus, ceux qui se forment en l'absence de l'air (mode par putréfaction) renferment, toutes choses égales, le taux le plus élevé d'azote. En généralisant ces faits, on arrive à cette conclusion : *le taux d'azote des humus est d'autant plus fort que les conditions de décomposition*

1. *Forschungen, etc.*, vol. XVII, p. 478.

sont plus défavorables et inversement. En général, le taux des matières minérales des humus marche du même pas que la décomposition, en ce sens que, enfermées en quelque sorte dans la masse organique, elles ne peuvent se solubiliser que dans la mesure où cette dernière se décompose. On ne peut d'ailleurs, jusqu'alors, donner de chiffres, du moins pour le plus grand nombre des dépôts d'humus. Il en est de même de l'influence qu'exerce la composition physique et chimique des détritus sur la composition chimique des humus. Dans cette voie, on ne connaît que quelques faits de détail.

On sait, par exemple, que les détritus des hêtres forment plus facilement des acides libres que ceux des chênes et des épicéas, tandis que de tous les arbres forestiers c'est chez les pins que cette propriété existe au moindre degré. Les détritus des bruyères et des airelles fournissent au contraire des doses importantes d'acide.

Enfin, la durée de l'altération influe sur la composition chimique des humus, surtout de ceux qui se sont formés dans des circonstances défavorables. Diverses observations faites dans les tourbières, montrent que la masse s'enrichit en carbone à mesure que la profondeur augmente. Dans de la tourbe séchée à l'air, j'ai obtenu[1] comme taux de carbone :

	A UNE PROFONDEUR DE		
	10cm,5-36cm,8	42cm,1-73cm,6	78cm,9-115cm,7
Tourbière de Cunrau . .	40.03	43.09	43.25

	A UNE PROFONDEUR DE				
	0m,0-0m,2	0m,2-0m,5	0m,5-0m,8	0m,8-1m,1	1m,1-1m,4
Tourbière du Danube.	40.12	42.64	42.80	44.05	45.24

Les recherches plus approfondies de W. Detmer[2] font aussi connaître les variations des autres éléments et des cendres avec les progrès de la décomposition. Trois échantillons de tourbe de Jess-

1. *Journ. für Landwirthschaft*, XXXIVe année, 1886, p. 176.
2. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XIV, 1871.

beck (Schleswig-Holstein), séchée à 120°, renferment (en rapportant à la matière combustible seule) :

	COUCHE SUPÉRIEURE.	A 7 PIEDS.	A 14 PIEDS.
	—	—	—
Carbone	57.75	62.02	64.07
Hydrogène	5.43	5.21	5.01
Oxygène	36.02	30.67	26.87
Azote	0.80	2.10	4.05
(Cendres)	(2.72)	(7.42)	(9.16)

Donc, à mesure que l'altération progresse, les produits deviennent plus riches en carbone et en azote, plus pauvres, au contraire, en hydrogène et en oxygène ; le taux des principes minéraux s'augmente aussi à mesure que la matière organique se volatilise.

A l'exception de la tourbe, on ne possède que peu de résultats utilisables sur la composition des dépôts naturels d'humus. Celui-ci est d'ordinaire mélangé, surtout dans les terreaux et les humus bruts, avec une assez forte proportion d'éléments terreux dont on ne peut le séparer, si bien que les analyses se rapportent non à l'humus pur, mais à un mélange d'humus et d'éléments minéraux.

Ce que j'ai appelé terreau (*Mull*) n'a pas encore été étudié à fond. C.-F.-A. Tuxen donne, pour le terreau de hêtre séché à l'air, un taux d'humus variant de 5.10 à 8.33 p. 100 ; dans un échantillon de Store Hareskov, il a trouvé 0.268 p. 100 d'azote et 1.494 p. 100 d'éléments minéraux solubles dans l'acide chlorhydrique.

Quelques analyses de l'humus brut des forêts ont été faites par A. Emmerling et G. Loges[1]. De l'humus de hêtre renfermait en pour-cent de la matière séchée à l'air :

Humus	29.17
Azote	0.387
Potasse	0.032
Chaux	0.089
Magnésie	0.030
Acide phosphorique	0.045

1. *Vereinsblatt des Haide-Kultur-Vereins für Schleswig-Holstein,* XIe année, 1883, p. 107 ; XVe année, 1886, p. 65.

dont

Humus	0.019
Azote.	0.0019
Potasse	0.001
Chaux	0.0015
Magnésie	»
Acide phosphorique . . .	0.00053

étaient solubles dans l'eau.

Dans d'autres essais, les mêmes chimistes ont obtenu les chiffres suivants :

Pour 100 de substance sèche il y a :

ÉLÉMENTS DOSÉS.	HUMUS BRUT de hêtre sur lehm.		HUMUS BRUT acide de hêtre.		HUMUS BRUT de bruyère sur sable.		HUMUS BRUT de feuilles mélangées sur sable	
	En totalité.	Soluble dans l'eau.	En totalité.	Soluble dans l'eau.	En totalité.	Soluble dans l'eau.	En totalité.	Soluble dans l'eau.
Eau combinée	3.05	»	2.93	»	2.10	»	3.87	»
Humus	7.44	0.368	63.16	0.107	6.30	0.833	14.70	0.845
Azote	0.37	0.0075	1.47	0.0372	0.145	0.0070	0.591	0.022
Principes minéraux.	89.14	0.325	32.44	0.741	91.46	0.076	80.81	0.265
	100.00	»	100.00	»	100.00	»	100.00	»
Ceux-ci contiennent :								
Potasse	1.426	0.0086	0.399	0.0081	0.591	0.0010	0.711	0.0019
Soude	0.668	0.0033	0.347	0.0103	0.649	0.0015	0.517	0.0023
Chaux.	1.247	0.0079	0.194	0.0007	0.466	0.0014	0.526	0.0025
Magnésie	0.357	0.0007	0.149	0.0007	0.310	0.0007	0.355	0.0012
Oxyde de fer.	2.316	0.0023	0.292	0.0088	0.200	0.0003	1.285	0.0025
Alumine.	11.037	»	2.879	»	3.374	»	7.851	»
Acide phosphorique.	0.143	0.0003	0.091	0.0169	0.026	0.0007	0.073	0.0015
Acide sulfurique	0.570	0.0098	0.087	0.0052	0.073	0.0017	0.308	0.0042
Acide silicique	71.064	0.0043	28.058	0.0060	86.521	0.0005	68.683	0.0065
100 parties d'humus contiennent : Azote	4.969	»	2.321	»	2.301	»	4.025	»
Sur 100 parties d'humus pur, il se dissout dans l'eau.	0.495	»	0.169	»	1.323	»	0.575	»
Sur 100 parties d'azote total, il se dissout dans l'eau :								
Sous forme d'ammoniaque . .	0.0692	0.2029	0.0661	0.2539	0.1807	0.4800	0.0819	0.3717
Sous forme d'azote organique.	0.1337		0.1818		0.2993		0.2898	

E. Ramann[1], dans ses recherches, a eu surtout en vue les matières

1. *Die Waldstreu*, Berlin, 1890, p. 29. — *Zeitschrift fur Forst- und Jagdwesen*, 1883.

minérales. Donnons cependant, pour être complet, les chiffres obtenus.

100 de sublance sèche contiennent :

ÉLÉMENTS DOSÉS.	HUMUS BRUT de pin sylvestre. Biesenthal.			HUMUS BRUT de pin sylvestre. Lauenbrück (Hanovre).	de hêtre. Glashütte.	mélangé. Hohenbrück.	de bruyère. Apenrade.
Potasse	0.655	0.242	0.514	0.283	0.404	0.921	0.781
Soude	0.042	0.242	0.119	0.325	0.160	0.059	0.890
Chaux	2.623	1.450	1.785	2.130	1.306	3.090	2.393
Magnésie	0.116	0.524	0.606	1.280	2.600	1.302	0.984
Alumine	6.105	3.507	4.869	10.700	7.410	6.402	10.094
Oxyde de fer	3.227	1.731	1.300	3.280	1.150	3.565	4.879
Oxyde de manganèse	0.104	0.443	0.210	0.203	0.213	0.360	0.036
Acide phosphorique	1.109	1.450	1.475	2.140	2.280	2.558	1.696
Acide sulfurique	2.060	1.864	1.350				
Chlore	0.440	1.331	1.110	?	?	?	?
Silice	26.421	14.111	10.850				
Azote	21.80	20.89	17.50				

On pourrait difficilement tirer de ces chiffres des conclusions générales, parce que, d'une part, la composition des matières est extrêmement variable et de l'autre le nombre des analyses est encore insuffisant.

Grâce à l'activité de la station d'essais de Brême, nous possédons des recherches plus approfondies sur la tourbe des tourbières infra et supra-aquatiques relativement aux substances qui intéressent la mise en culture de ces terrains. Citons les chiffres suivants, tirés des publications de M. FLEISCHER[1].

1. *Landwirthschaftliche Jahrbücher,* vol. XX, 1891, p. 378. — MENTZEL und LENGERKE'SCHER *Landw. Kalender,* 1888, p. 48. Voir aussi F. SENFT., *Die Torf-, Humus-, Marsch- und Limonitbildungen,* Leipzig, 1862, p. 135. — F. SITENSKY, *Ueber die Torfmoore Böhmens,* Prague, 1891, p. 207-215.

Composition des sols des tourbières à sphaignes ou supra-aquatiques de l'Allemagne du Nord en pour-cent de substance sèche.

LOCALITÉS.	MATIÈRES combustibles.	MATIÈRES minérales.	SABLE et argile.	AZOTE.	POTASSE.	CHAUX.	ACIDE phosphorique.
a. Couche supérieure. (Humus de bruyère).							
Tourbière de Lilienthal.	96.32	3.68	2.43	1.08	0.03	0.20	0.06
Tourbière de Hellweg	83.30	16.70	14.73	1.19	0.06	0.37	0.12
Tourbière de Bourtang.	83.30	16.70	14.25	1.45	0.07	0.35	0.14
Tourbière de Papenburg	83.98	16.02	13.01	1.55	0.08	0.37	0.10
b. Couche profonde. (Tourbe de sphaigne).							
Tourbière de Lilienthal.	98.74	1.26	0.59	0.56	0.01	0.10	0.02
Tourbière de Hellweg	98.74	1.26	0.33	0.75	0.04	0.14	0.03
Tourbière de Bourtang.	97.86	2.14	0.63	1.03	?	0.21	0.05
Tourbière de Papenburg	97.56	2.44	0.63	0.93	?	0.27	0.04

Tourbière infra-aquatique en pour-cent de substance sèche.

LOCALITÉS.	MATIÈRES combustibles.	MATIÈRES minérales.	SABLE et argile.	AZOTE.	POTASSE.	CHAUX.	ACIDE phosphorique.
Nickwarzbruch (Prusse occidentale).	70.17	29.83	18.11	2.97	0.09	4.25	0.59
Iserauer Wiese (Prusse occidentale).	81.51	18.49	7.15	3.33	0.07	4.51	0.30
Landsdorf, près du lac de Trieb (Poméranie)	80.26	19.74	5.70	3.55	0.05	4.84	0.98
Gunrau (Saxe)	82.56	17.44	6.78	3.23	0.05	5.96	0.25
Fienerbruch (Saxe)	76.19	23.81	10.34	2.40	0.10	6.71	0.15
Dresow, près de Gr. Justin (Poméranie)	81.70	18.30	3.21	2.85	0.09	7.25	0.14
Zalesie, près de Nakel (Posen). . .	45.72	54.28	13.20	2.10	0.08	9.23	1.01
Sammenthin, près d'Arnswalde (Brandebourg)	44.06	55.94	?	?	?	18.00	12.89
Pœtzig, près de Schœnfliess (Brandebourg)	42.16	57.84	4.60	1.78	0.07	26.62	0.11

Cette composition accuse, entre les divers éléments, des différences importantes qui apparaissent plus grandes encore par com-

paraison avec les analyses précédentes. Ces différences dans la composition des deux groupes principaux de tourbières prennent plus d'importance par ce fait que les tourbières plus riches en pour-cent d'azote, chaux et acide phosphorique possèdent en général une plus grande densité, si bien que, pour une surface et une profondeur déterminées, elles renferment beaucoup plus de matières solides que les tourbières pauvres. Les moyennes ci-dessous, calculées sur un assez grand nombre d'analyses de M. Fleischer [1], donnent à cet égard une meilleure idée du fait.

100 parties de substance sèche contiennent :

	AZOTE.	MATIÈRES minérales.	POTASSE.	CHAUX.	ACIDE phosphorique.
Tourbière à sphaigne.	—	—	—	—	—
Humus de bruyère (couche supérieure)	1.2	3.0	0.05	0.35	0.10
Tourbe de sphaigne	0.8	2.0	0.03	0.25	0.05
Tourbière infra-aquatique.					
Tourbière de vallée	2.5	10.0	0.10	4.0	0.25
Tourbière de montagne.	2.0	5.0	0.10	1.0	0.20

Une couche de 20 centimètres renferme par hectare :

	POIDS total.	AZOTE.	POTASSE.	CHAUX.	ACIDE phosphorique.
	—	—	—	—	—
Tourbière à sphaigne.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Humus de bruyère (couche supérieure)	240 000	2 880	100	840	240
Tourbe de sphaigne	180 000	1 450	54	450	72
Tourbière infra-aquatique.					
Tourbe de vallée	500 000	12 500	500	20 000	1 250
Tourbe de montagne. . . .	360 000	7 200	72	3 600	720

1 mètre cube de sol frais contient en substance sèche :

Tourbière à sphaigne.	
Humus de bruyère (couche supérieure). . .	120 kilogr.
Tourbe de sphaigne	90 —
Tourbière infra-aquatique.	
Tourbe de vallée.	250 —
Tourbe de montagne	180 —

1. Mentzel und Lengerke'scher *Landw. Kalender,* 1892, p. 14.

De la comparaison de ces chiffres, il ressort nettement que :

1° *Le taux de chaux est la différence caractéristique entre les tourbières infra et supra-aquatiques, les premières étant beaucoup plus riches en chaux que les secondes.* Les causes de ces différences ont déjà été indiquées plus haut (p. 290 et 295);

2° *Les tourbières infra-aquatiques sont plus riches aussi en principes minéraux et surtout en acide phosphorique;*

3° *La pauvreté en potasse est un caractère commun aux deux grands groupes de tourbières.* Les infra-aquatiques contiennent en général, il est vrai, un peu plus de matières nutritives, mais la différence est trop faible pour être caractéristique et pour désigner, comme riches en potasse, les sols formés par les tourbières infra-aquatiques. Cette pauvreté en potasse tient probablement à ce que cette base forme, avec les acides de l'humus, des sels facilement solubles qui sont vite lessivés.

En se fondant sur les précédentes analyses de cendres de tourbe, on voit que le taux de soude est généralement inférieur, mais parfois aussi supérieur à celui de la potasse. La magnésie se comporte comme la chaux. L'oxyde de fer, l'alumine, l'acide sulfurique et la silice ne manquent jamais dans la tourbe, mais s'y montrent en proportions très variables. On peut admettre en général que l'alumine et la silice diminuent en proportion de l'oxyde de fer et de l'acide sulfurique. Parmi ces derniers principes minéraux, c'est habituellement l'oxyde de fer qui domine; il y en a 70 p. 100 et plus dans les cendres. Il résulte aussi des analyses de cendres de tourbe que :

4° *Les tourbières infra-aquatiques sont en moyenne notablement plus riches que les autres en sels de fer.*

Si nous passons aux matières organiques, on reconnaît très nettement, d'après les données ci-dessus, que :

5° *La matière organique combustible existe dans les tourbières à sphaignes en proportion beaucoup plus forte que dans les tourbières infra-aquatiques,* les éléments minéraux (incombustibles) présentant le rapport inverse. Ainsi s'explique pourquoi la tourbe des tourbières supra-aquatiques est bien plus combustible que celle des infra-aquatiques. Quant aux corps simples, les recherches de

FLEISCHER et de SITENSKY n'accusent de différences importantes, entre les deux groupes, que pour l'azote;

6° *Les tourbières infra-aquatiques se distinguent des autres par un taux d'azote bien plus élevé.*

L'altérabilité de la tourbe, très faible comme nous l'avons dit maintes fois (p. 166 et 286) présente, dans les deux groupes de tourbières, des différences non négligeables qui peuvent se préciser ainsi :

7° *Avec des circonstances favorables, la décomposition de la matière organique se fait mieux dans les tourbières infra-aquatiques que dans les autres.* Ceci peut se déduire du fait établi d'abord par M. FLEISCHER[1] que, à conditions égales, l'air occlus dans le sol est plus riche en acide carbonique, ce produit final de la décomposition, dans les tourbières infra-aquatiques que dans les tourbières à sphaignes, comme le montrent les moyennes suivantes :

100 litres d'air confiné dans le sol renfermaient, sur 30 centimètres de profondeur :

	SOL avec couverture de sable.	SOL MÉLANGÉ de sable à la surface.
	grammes.	grammes.
Tourbière supra-aquatique. . . .	9,333 CO^2	8,876 CO^2
Tourbière infra-aquatique. . . .	35,260 —	23,379 —

L'air contenu dans le sol, riche en chaux, de la tourbière infra-aquatique de Cunrau, contenait donc trois à quatre fois plus d'acide carbonique que celui d'une tourbière supra-aquatique, pauvre en chaux.

Dans mes expériences, les différences ont été plus faibles, mais dans le même sens.

1 000 volumes d'air confiné dans le sol[2] contenaient, sur 30 centimètres de profondeur, un volume d'acide carbonique de :

	1892.	1893.	1894.
Tourbière supra-aquatique (Haspel). . . .	4.471	3.420	3.547
Tourbière infra-aquatique (Schleissheim). .	6.743	6.074	6.278

1. *Landw. Jahrbücher*, vol. XX, 1891, p. 884.
2. Moyenne de 26 dosages.

M. Fleischer[1] a montré aussi que l'eau extraite de la tourbe était soixante-dix fois plus riche en acide nitrique dans une tourbière très calcaire que dans une autre pauvre en chaux, ce qui tient sans doute à la différence des taux de chaux dans les deux groupes de tourbières (p. 187 et 191).

Mentionnons enfin que l'azote dans les tourbières existe presque exclusivement sous forme organique; quand, par le dessèchement, l'air peut pénétrer dans le sol, une partie relativement faible de l'azote se transforme en ammoniaque qui, dans certaines conditions encore à préciser, passe à l'état d'acide nitrique.

C'est le moment d'ajouter quelques remarques sur les

Minéraux des tourbières,

d'autant plus que quelques-uns seront étudiés spécialement lorsqu'il sera parlé, au chapitre III, de la culture de ces sols.

Parmi les minéraux d'origine organique, il y a tout d'abord à citer la *Dopplérite*[2] (*Haidinger*), sorte de charbon résineux de tourbe, produit homogène, à formation très lente, qui a été rencontré jusqu'alors dans quelques tourbières de la Suisse, de la Carniole, de la Bohême et de la Frise orientale.

La dopplérite mûre se montre uniformément noire, élastique, de consistance gélatineuse, de teinte jaune brun, translucide comme une mince membrane ramollie de gutta-percha. La dopplérite en voie de formation est grenue et diffère par là de la précédente quant à ses propriétés optiques ; sa couleur varie du brun de cuir au jaune-rouille ; quand elle est très humide, elle devient gélatineuse. Ce minéral n'est pas de nature simple ; il est formé, comme la tourbe, d'un mélange variable de combinaisons organiques et minérales et, comme elle, contient presque sans exception de l'azote. Les principes minéraux y varient en qualité et quantité suivant la tourbe où la dopplérite a pris naissance. Les bases sont combinées pour la plus grande partie à la matière organique et, pour une faible part,

---

1. Mentzel und Lengerke'scher *Landw. Kalender,* 1888, p. 50.
2. J. J. Früh, *Ueber Torf und Dopplerit,* Zurich, 1883, p. 64-84.

aux acides minéraux qui s'y trouvent en même temps. La dopplérite consiste donc essentiellement en humates avec quelque peu de sels inorganiques appartenant surtout aux sulfates, phosphates et silicates. Suivant les conditions de production, la composition oscille entre certaines limites comme il ressort des chiffres suivants :

Composition de la dopplérite séchée à 110°.

(Le calcul est fait sur la matière débarrassée de ses cendres.)

Cendres	2.23-14.3
Carbone	51.11-58.25
Hydrogène	5.14- 6.29
Oxygène	34.16-42.49
Azote	0.0 - 2.27

La dopplérite existe toujours dans la tourbe infra-aquatique qui se compose d'hypnums, de carex et de phragmites difficilement

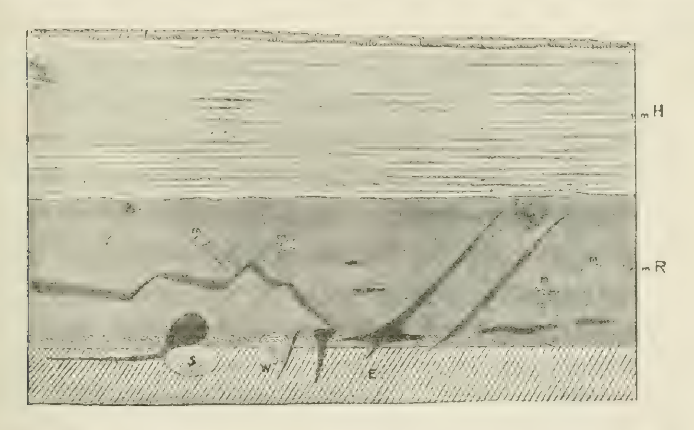


Fig. 50. — Coupe idéale à travers une tourbière supra-aquatique des Préalpes (d'après Früh).

E, terrain erratique; R, tourbe de gazon; H, tourbe de sphaigne; *m*, jeunes noyaux de dopplérite; S, grès; W, racine ou tige d'épicéa; les traits noirs indiquent la dopplérite sous des formes variées.

décomposés (fig. 50). Ainsi s'explique le fort taux de chaux de ses cendres.

La *Fichtélite* (*Bromeis*), qui, d'après Fickenscher, existe dans la tourbière desséchée de Redwitz, en Bavière, et aussi, d'après Göppert, dans les tourbières d'Eger (*Scheerérite*), se forme aux dépens

de la résine des tiges de pins et d'épicéas enfouies dans la tourbe[1]. On la trouve dans les fentes de l'écorce et entre les anneaux ligneux sous forme de lamelles cristallines ou de croûtes minces, plus rarement en aiguilles. Elle est nacrée, inodore et insipide, plus légère que l'eau et plus lourde que l'alcool et se dissout très facilement dans l'éther. D'après sa composition élémentaire, sa formule est C_4H_3 (*Bromeis*).

Parmi les composés inorganiques des tourbières, il faut mentionner d'abord la *terre de diatomées* (Kieselguhr) qui appartient du reste plutôt aux fossiles qu'aux minéraux.

D'après SITENSKY, les diatomées abondent dans la plupart des tourbes de Bohême qui se forment sur fond argileux dans et près les étangs. Ces tourbes ont d'ordinaire une teinte plus ou moins grise, se dessèchent vite et sont friables. Sur beaucoup de points la terre de diatomées n'est pas mélangée à la tourbe, mais se montre en couches plus ou moins étendues ayant jusqu'à 50 centimètres d'épaisseur, ou en amas de la grosseur de la tête ou plus petits, soit sur les fonds argileux au bord des tourbières, soit même en veines plus ou moins épaisses incluses dans la masse ou en nodules à sa surface.

Le *calcaire des tourbières* (Moorkalk, Moormergel) est plus important. Il se présente en nodules intercalés dans la tourbe, ou en couche continue plus ou moins épaisse, dans le fond de la tourbière, à la surface du sous-sol minéral. Dans le sud de la Bavière, le calcaire des tourbières[2] forme, dans beaucoup de tourbières infra-aquatiques (Erdinger, Dachau-Schleissheimer), une couche généralement continue qui repose sur le diluvium glaciaire parfaitement perméable et qui est recouverte par la masse de tourbe. Le calcaire des tourbières (*Alm*) est blanc et à grain extrêmement fin, ce qui fait qu'il a une grande faculté d'imbibition et une très faible perméabilité. Il forme avec l'eau une masse visqueuse. A l'état sec, il est friable et se délite à l'air en une masse pulvérulente, très meuble. Il consiste surtout en calcaire amorphe comme il résulte des ana-

1. *Jahrbuch der Mineralogie*, 1841, p. 848.
2. Que l'on appelle *Alm* dans ce pays.

lyses suivantes de l'*Alm* de Memmingen faites par H. VOGEL[1] sur la matière séchée à l'air :

Acide carbonique	41,060
Chaux	50,307
Magnésie	0,098
Alumine et oxyde de fer	0,864
Silice.	0,250
Acide sulfurique	0,463
Sels alcalins	0,513
Eau	0,366
Matière organique.	5,000
	98,911

L'acide phosphorique ne s'y trouva pas une fois à l'état de trace ; le chlore, l'acide nitrique et l'ammoniaque y existaient en quantités minimes.

L'origine de ce calcaire des tourbières n'est pas encore suffisamment établie. En tout cas, il se trouvait d'abord à l'état de dissolution ; du moins sa forme montre qu'on doit le considérer comme un précipité. E. RAMANN[2] croit devoir admettre, d'après ses observations, que le calcaire des tourbières provient de la dissolution des coquilles par les acides de l'humus ; leur chaux se montre là où agissent des influences extérieures (air atmosphérique ou eau du sous-sol) et où par oxydation l'humate de chaux peut se détruire en reformant du carbonate de chaux. O. SENDTNER[3] pense, au contraire, que la formation du calcaire des tourbières précède celle de la tourbe ; du moins cherche-t-il à expliquer ainsi la naissance sur fond de galets des tourbières du sud de la Bavière. D'après lui, l'eau chargée de bicarbonate de chaux s'infiltrant à travers les cailloux doit déposer peu à peu à leur surface une couche de calcaire par suite du dégagement d'une partie de l'acide carbonique ; il se forme ainsi un fond imperméable sur lequel la tourbe peut se développer.

---

1. *Berichte des Augsburger naturhistorischen Vereins,* 1885, p. 166.
2. *Forstliche Bodenkunde,* p. 128.
3. *Die Vegetationsverhältnisse Südbayerns,* 1854, p. 622.

Cette explication est très vraisemblable pour les localités en question ; mais il se peut aussi, comme le reconnaît SENDTNER, que la production du calcaire des tourbières soit ailleurs postérieure à la tourbe.

Un autre minéral très répandu dans les tourbières est la *pyrite* qui existe sous ses deux formes, *pyrite* et *marcasite,* et provient de l'action réductrice des détritus organiques quand de l'eau ferrugineuse rencontre du sulfate de chaux. Il se forme alors, par réduction, du sulfure de fer dont la formule est FeS_2. Ce composé, déjà si nuisible à la végétation, peut devenir néfaste quand il est en contact avec l'air, parce qu'il se transforme alors en sulfate ferreux et acide sulfurique qui, dans la proportion où ils existent parfois, détruisent toute végétation[1]. Ce dédoublement peut être représenté par l'équation chimique suivante :

$$\underset{\text{Pyrite.}}{FeS_2} + \underset{\text{Oxygène.}}{O_7} + \underset{\text{Eau.}}{H_2O} = \underset{\text{Sulfate ferreux.}}{FeSO_4} + \underset{\text{Acide sulfurique.}}{SO_4H_2}$$

Le sulfate ferreux peut souvent s'oxyder plus et devenir du sulfate ferrique. Celui-ci existe en effet dans les tourbières mais en bien moindre quantité que le premier. Dans cette réaction il se forme de l'acide sulfurique libre avec production de sulfate de fer 5-basique et séparation d'hydroxyde de fer[2].

Le sulfate ferreux se produit parfois en si grande quantité, qu'on peut obtenir facilement de l'extrait aqueux ce sel en cristaux. Sous l'eau, en l'absence d'air, le sulfate peut être de nouveau réduit par les matières humiques et ramené à l'état de pyrite. Celle-ci se présente dans les tourbières et dans leurs substratums à l'état finement disséminé, ne se laissant pas reconnaître à l'œil nu, ou bien en nodules et en fortes et larges plaques (marcasite) ou en écailles minces brillantes et en petits grains (pyrite) ou souvent comme minéralisation de débris végétaux (SITENSKY).

1. M. MÆRCKER, *Zeitschrift des landw. Centralvereins der Provinz Sachsen,* 1874, p. 70. — M. FLEISCHER, *Landw. Jahrbücher,* vol. XV, 1886, p. 78, et vol. XX, 1891, p. 955. — W. TH. OSSWALD, *Landw. Jahrbücher,* vol. VI, 1877, p. 391.

2. E. HEIDEN, *Lehrbuch der Düngerlehre,* Stuttgart, 1866, vol. I, p. 411.

Le sulfate ferreux et l'acide sulfurique provenant de l'oxydation de la pyrite subissent dans les tourbières de nombreuses transformations qui donnent lieu à des composés divers. A ceux-ci appartient d'abord l'*hématite brune* provenant de la transformation du sulfate ferreux et du calcaire sous l'action de l'eau et de l'oxygène. Cette réaction peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$2FeSO_4 + 2CaCO_3 + 3H_2O + O = Fe_2O_6H_6 + 2CaSO_4 + 2CO_2$$

$2FeSO_4$	$2CaCO_3$	$3H_2O$	O	$Fe_2O_6H_6$	$2CaSO_4$	$2CO_2$
Sulfate ferreux.	Carbonate de chaux.	Eau.	Oxygène.	Hydroxyde de fer (hématite brune).	Sulfate de chaux.	Acide carbonique.

Très souvent l'hématite brune dans les tourbières est due à l'action physiologique des colonies de *Crenothrix* et *Cladothrix*, hôtes habituels des eaux de source. Elle se présente, généralement souillée de matières organiques et même minérales, surtout argileuses, sous forme de terre ocreuse, colorée en jaune foncé ou en brun rouge ; elle est soit en nids, soit en veines, soit en couches variant de plusieurs centimètres à quelques décimètres d'épaisseur (SITENSKY).

Dans les parties les plus profondes des tourbières on trouve très souvent la *limonite* ou *fer des marais*, formée surtout d'hydroxyde de fer mélangé à du protoxyde de fer, de la silice, de l'argile, de la chaux, de la magnésie, de l'humus et du phosphate de fer. Le taux d'oxyde de fer varie de 23.24 p. 100 à 82.38 p. 100, celui de la silice de 2.80 à 12.60, celui de l'acide phosphorique de 0.19 à 10.99[1]. La limonite constitue des masses solides, dures, de teinte brune ou noire, de forme sphérique, globuleuse ou stalactitique, se présentant en amas ou en couches continues. Elle est parfois tachée en vert ou en beau bleu par du phosphate de fer en mélange.

Ce phosphate, nommé *vivianite*, existe aussi dans les tourbières en masses terreuses d'un bleu verdâtre ou en nodules ou en pellicules, ou comme pseudomorphose de tiges ligneuses ou comme remplissage de coquilles. Selon SENFT, il peut se produire par l'action sur le carbonate ou l'humate ferreux dissous de l'acide phosphorique formé par l'oxydation du phosphore des matières azotées

1. F. SENFT, *loc. cit.*, p. 174.

des végétaux des tourbières, ou encore par l'action du sulfate ferreux sur le phosphate de chaux contenu dans le bois et dans les détritus animaux. Dans la Frise orientale, le phosphate ferreux est considéré comme le signe d'une bonne tourbe[1].

Signalons enfin, pour être complet, le *fer humique* (Modereisen) formé d'humate de fer, d'eau, d'un peu d'oxyde de fer et de sulfate de magnésie et constituant dans les fossés d'écoulement une masse opaque, noire, d'éclat résineux, durcissant par la sécheresse.

C'est à la présence du sulfate ferreux et de l'acide sulfurique libre dans la tourbe que beaucoup de minéraux doivent leur naissance. Nommons d'abord le *gypse* qui procède de l'hématite brune et de l'action de l'acide sulfurique sur le calcaire. Cette réaction est caractérisée par l'équation suivante :

$$SO_4H_2 + CaCO_3 = CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

SO_4H_2	$CaCO_3$	$CaSO_4$	CO_2	H_2O
Acide sulfurique.	Carbonate de chaux.	Sulfate de chaux.	Acide carbonique.	Eau.

Le gypse se rencontre dans presque toutes les tourbières pyriteuses et calcaires en croûtes formées de petits cristaux sur les parois desséchées des trous d'extraction et sur les briques de tourbe.

L'action de l'acide sulfurique sur le silicate de magnésie donne dans la tourbe du *sulfate de magnésie;* quand l'acide agit sur un sous-sol argileux ou schisteux, il se forme dans les couches profondes argileuses du *sulfate d'alumine*[2].

Le *soufre* se trouve plus rarement sous forme d'un revêtement blanc jaunâtre. Il peut se déposer par l'action des algues sulfuraires (*Beggiatoacées*) ou par la destruction du sesqui-sulfure de fer $Fe\,S_3$, qui se produit par la réaction de l'hydrogène sulfuré sur l'hydroxyde de fer et qui dans l'air humide se transforme très vite en un mélange d'oxyde de fer et de soufre[3].

1. On l'appelle dans ce pays *Stijfel.*

2. Sitensky, *loc. cit.*, p. 218.

3. M. Mærcker, *Zeitschrift des landw. Centralvereins der Provinz Sachsen*, 1874, p. 69.

Comme conclusion à ces considérations sur les propriétés chimiques de l'humus, étudions maintenant l'absorption des principes nutritifs par l'humus.

d) *Absorption des principes nutritifs par l'humus.*

Il faut tout d'abord ne pas perdre de vue que les matières humiques formées de substances organiques et inorganiques sont très complexes, et par suite les phénomènes qui s'y passent.

La matière organique de l'humus ne peut évidemment avoir d'action chimique que par les acides qui y sont contenus en proportions variables et, dès lors, elle ne peut exercer une absorption notable que sur les bases comme les terres alcalines (chaux, magnésie), l'oxyde de fer et l'alumine qui forment avec les acides de l'humus des combinaisons insolubles. Il ne peut y avoir absorption des alcalis (potasse, soude, ammoniaque) par ce procédé, puisque les humates correspondants sont solubles dans l'eau. Mais comme l'humus renferme plus ou moins de principes minéraux, il y a, en général, aussi une forte absorption de bases alcalines paraissant tenir surtout à ce qu'il se forme des sels doubles insolubles d'humates alcalins et d'humates alcalino-terreux (p. 305). Il s'ensuit que dans la nature l'humus possède, vis-à-vis des alcalis, des terres alcalines, de l'oxyde de fer, de l'alumine, un pouvoir d'absorption considérable, en n'envisageant que les processus purement chimiques. Les acides sulfurique, chlorhydrique et phosphorique au contraire ne sont pas absorbés de cette façon.

Les matières humiques ont encore la propriété d'absorber par un procédé purement mécanique, à l'instar des substances colloïdales, les acides, les bases et les sels. La solution des acides de l'humus est de nature colloïdale, comme celle qu'on obtient par dissolution de la substance coagulée provenant d'une solution alcaline précipitée par un acide. A cet état, comme l'a démontré si nettement J. M. Van Bemmelen[1], ces matières peuvent fixer certaines quantités d'autres substances provenant de la solution d'où on les a séparées;

1. *Landw. Versuchsstationen*, vol. XXXV, p. 69-136. — *Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas*, Leide, 1888, t. VII, p. 37.

si elles sont séparées à l'état pur et mises ensuite dans une solution d'autres matières, elles peuvent en absorber une partie. L'auteur précité nomme ces composés des *combinaisons d'absorption.*

L'affinité est relativement faible, mais pourtant suffisante pour permettre de séparer de la gelée par de l'eau souvent renouvelée (dialyse) ou par lavage lent ces combinaisons qui restent dans l'eau de la gelée. Les molécules d'eau et les molécules d'acide, etc., ont entre elles une affinité plus grande que l'*attraction* exercée sur elles par le reste de l'eau présente.

Les sels absorbés par la gelée peuvent, dans les dissolutions d'autres sels, provoquer non seulement des décompositions ou de véritables combinaisons, mais encore des substitutions chimiques.

Les matières colloïdales de l'humus donnent des combinaisons d'absorption avec les acides et les sels et plus facilement encore avec les bases. Les sels et les acides sont absorbés en faible quantité et les bases en quantité plus grande. Les alcalis sont fixés plus énergiquement que la chaux, mais le sel de chaux est moins soluble. Si, donc, on traite l'humus par une dissolution d'un sel alcalin, il se fixera une certaine quantité d'alcali en substitution à de la chaux et de la magnésie. Mais si on traite la combinaison soluble d'humus et d'alcali avec une solution de chaux, il se formera une certaine quantité d'humate de chaux insoluble. Quand on extrait l'humus par un acide étendu et qu'on détruit ainsi les combinaisons colloïdales de l'humus avec ses bases, on obtient le minimum d'absorption.

Il résulte de ces quelques faits que l'humus peut absorber surtout des bases en assez grande quantité soit chimiquement, soit mécaniquement. S'il contient des matières minérales, ce qui arrive d'ordinaire, en proportion plus ou moins grande, à l'absorption par l'humus vient s'ajouter l'absorption par ces matières minérales, qui est un processus analogue à l'absorption par les zéolithes. Il résulte, comme lui, d'un échange de bases. De l'humus forestier provenant d'arbres creux d'une forêt de hètres fut mis par Rautenberg[1] dans une solution de chlorure d'ammonium contenant

1. R. Sachsse, *Lehrbuch der Agrikulturchemie,* Leipzig, 1888, p. 176.

1gr,605 de chlorure dans 300 centimètres cubes ; il absorba 0gr,0845 d'ammoniaque. Il s'était dissous une quantité de chaux (0gr,1044) et de magnésie (0gr,0394) presque équivalente à l'ammoniaque absorbée. La quantité d'ammoniaque exactement équivalente serait 0gr,0968. En faisant bouillir l'humus avec de l'acide chlorhydrique étendu, sa puissance d'absorption diminue d'un quart.

Les humus pourvus de plus fortes doses de matières minérales sont naturellement capables aussi d'absorber des acides. L'acide phosphorique est fixé en proportion d'autant plus forte que les humus contiennent plus de principes minéraux pouvant former avec lui des sels insolubles[1].

C'est pourquoi les tourbières infra-aquatiques plus riches en terres alcalines que les tourbières à sphaignes ont un pouvoir d'absorption plus grand et plus énergique. La silice n'est absorbée qu'en présence de bases entrant en combinaison avec elle. Aussi reste-t-elle souvent dissoute dans les sols humifères, tandis que la base qui lui était associée (potasse) est absorbée. Ce fait remet involontairement en mémoire l'influence que les débris végétaux en décomposition exercent sur le développement des plantes exigeant beaucoup de silice (roseaux, prêles, herbes acides dominant dans les marais tourbeux et acides). Si on chaule de tels sols, ces plantes disparaissent, parce que la silice se combine à la chaux qu'on apporte.

2. — Propriétés physiques des humus.

a) *Propriétés physiques générales.*

A) La *couleur* de l'humus varie beaucoup et dépend de l'espèce et du degré de décomposition, de la composition de la matière première et du taux d'humidité.

Les humus formés par érémacausis ont une teinte qui varie du brun foncé au noir, tandis que les produits de la putréfaction ont une couleur plus rouge brun. Celle-ci, par dessiccation, passe au brun noir et au noir de jais, surtout chez certaines tourbes qui, au

1. A. König, *Landw. Jahrbücher,* vol. XI, 1882, p. 1-49.

bout de peu de temps, offrent ce changement de coloration par suite de l'action de l'oxygène. Plus la décomposition est avancée, plus la couleur se fonce. Cette couleur dépend aussi de la matière première ; ainsi les tourbes infra-aquatiques sont toujours plus foncées que les tourbes à sphaignes, lesquelles sont jaunes, jaune rouge ou brun clair suivant le degré de leur décomposition. Des tourbes de carex et de roseaux lavées et peu décomposées sont souvent comme blanchies. A l'état humide les humus montrent une coloration beaucoup plus foncée qu'à l'état sec.

B) La *structure* ou *texture* des couches d'humus est extrêmement variable suivant la composition des plantes formatrices, suivant la compression et suivant le degré de la décomposition.

Le terreau (*Mull*) a toujours une texture poreuse. L'humus brut est tantôt fibreux (bruyères, pins, hêtres, airelles), tantôt terreux (steppes, fougères, etc.) et plus ou moins compact.

Dans les tourbes infra-aquatiques encore peu décomposées l'humus est un tissu lâche, feutré, à fibres enchevêtrées (tourbe fibreuse), tandis que la tourbe supra-aquatique est spongieuse et friable, se réduisant en grumeaux. Par les progrès de l'altération, les différences entre les variétés de tourbe s'effacent peu à peu ; les couches deviennent plus denses, plus compactes et quand la tourbe est très vieille elle présente un aspect graisseux, poisseux (tourbe poisseuse) et forme une masse plastique amorphe. Le plus ou moins de compacité des couches dépend de l'âge, mais aussi de la pression qu'elles supportent et de l'eau qu'elles contiennent.

Souvent les tourbières présentent des stratifications qui, d'après F. Sitensky[1], se montrent en Bohême le plus nettement dans la tourbe d'hypnum parmi les parties non encore complètement humifiées, et qui, dans les points les plus bas et les plus aqueux, sont surmontés souvent par 5 mètres et plus de tourbe compacte, presque amorphe. Une tourbe se formant ainsi avec excès d'eau sous la pression des couches supérieures a une stratification parfaite ; tant qu'elle est humide, les plantes qui la composent se laissent

1. F. Sitensky, *Ueber die Torfmoore Böhmens*, Prague, 1891, p. 190.

séparer en feuillets très minces. La tourbe provenant de plantes herbacées est toujours, dit cet auteur, beaucoup mieux stratifiée que celle qui est due aux airelles, callunes et plantes analogues. Celle-ci, desséchée, se fragmente en petits morceaux, tandis que la première manifeste sa stratification par les fentes qui s'y produisent au dessèchement. La structure schisteuse de la tourbe n'est parfaitement nette que quand elle est pressée par d'autres couches. Avec une faible pression, la tourbe conserve sa texture primitive tant que la décomposition ne la modifie pas. Assez souvent, surtout dans les tourbières infra-aquatiques, la stratification est troublée par les nombreux rhizomes ou racines de monocotylédones aquatiques et d'équisetums qui traversent verticalement les couches. Dans la tourbe de roseaux pure ou mélangée, les lits sont perforés par les rhizomes jaune clair, gros comme un tuyau de plume ou même le doigt, du *Phragmites communis* ou du *Glyceria spectabilis*. Ces rhizomes gardent leur aspect même quand le reste de la tourbe a déjà pris une teinte brune, presque noire.

Par la gelée l'humus devient plus poreux, parce que l'eau contenue dans les pores et entre les lames de la tourbe se dilate en se transformant en glace qui sépare les particules les unes des autres. Cette action n'amène pas toujours un émiettement complet de la masse, mais provoque toujours un certain gonflement. Une partie de l'eau se trouve, de la sorte, isolée et s'évapore plus vite que quand elle était absorbée par l'humus. Ainsi s'explique que les morceaux de tourbe congelés se dessèchent plus rapidement que les autres.

A la suite du dessèchement des tourbières, leur masse devient aussi plus poreuse, puisqu'une partie de l'eau a disparu par cette opération qui accélère l'aération des parties desséchées.

Grâce à la décomposition plus active des couches d'une tourbière exposées au jour et au dessèchement, les débris végétaux se fragmentent plus ou moins complètement et forment alors une masse terreuse feutrée, semblable à de la sciure et possédant une texture poreuse (terre de tourbe) (p. 295).

C) Les *changements de volume* des masses humiques sont en général très accentués ; elles se gonflent par l'humectation et se con-

tractent beaucoup par le dessèchement. L'intensité de ces changements varie suivant la substance et son degré d'altération. L'humus résultant de l'action de l'acide sulfurique sur le sucre n'éprouve par l'humectation et le dessèchement que des changements de volume insignifiants ; ils sont relativement plus forts chez la tourbe privée de ses éléments minéraux et résineux par l'acide chlorhydrique et le mélange d'éther et d'alcool ; mais les plus remarquables sont ceux que présentent les humus naturels et à un degré d'autant plus élevé que leur décomposition est plus avancée.

Voici quelques chiffres que j'ai obtenus en expérimentant sur des humus et sur des sols minéraux :

Augmentation du volume par humectation rapportée à 100 de la masse sèche.

Humus de sucre	4.814
Tourbe traitée par l'acide chlorhydrique et l'éther . . .	15.928
Tourbe naturelle (des tourbières du Danube) :	
De $0^m,0$ à $0^m,2$ de profondeur	46.793
De 0 ,2 à 0 ,5 —	50.154
De 0 ,5 à 0 ,8 —	60.979
De 0 ,8 à 1 ,1 —	83.820
Sable quartzeux grossier	0.000
Argile (kaolin)	36.608
Carbonate de chaux.	5.093

Il résulte de ces chiffres que : 1° l'humus artificiel comme celui qui est traité par l'acide chlorhydrique et l'éther augmentent beaucoup moins de volume par l'humectation que l'humus naturel ; 2° *celui-ci se dilate bien plus que l'argile qui occupe à cet égard la première place parmi les éléments minéraux,* et 3° *l'humus naturel éprouve des changements de volume d'autant plus importants que sa décomposition est plus avancée.*

Le gonflement considérable des humus naturels par l'humectation et leur retrait, considérable aussi, par la dessiccation tiennent en partie à leur taux en matières colloïdales qui se gonflent beaucoup en absorbant l'eau et se rétractent fortement en la perdant. Avec les progrès de la décomposition, les changements de volume de l'humus sont d'autant plus accusés que le taux des substances colloï-

dales augmente davantage. Mais il est certain que les autres éléments de l'humus et les parties des plantes encore peu décomposées possèdent des propriétés analogues.

Cette contraction de l'humus par le dessèchement fait que les tourbières desséchées se raffermissent peu à peu et d'autant plus que la tourbe y était plus décomposée et plus aqueuse. F. Sitensky[1], par exemple, a observé qu'un bombement de 2^{m},3 s'était abaissé en trois ans à 1^{m},50 et que, dans une autre tourbière, il s'était réduit presque au tiers. Une tourbière formée presque entièrement de *Sphagnum cymbifolium* s'est réduite environ à moitié de son volume primitif par le dessèchement, une autre (*Hypneto-caricetum*) très décomposée au quart et une tourbe de vase au cinquième.

Il se forme assez souvent, par ce retrait, des fentes et des failles surtout aux bords des tourbières et parfois sur 100 mètres et plus de longueur (Sitensky).

Par suite de l'inégalité des diverses couches de tourbe au point de vue de l'état physique, de la faculté d'imbibition et du taux d'eau, ces couches chevauchent souvent l'une sur l'autre ; elles peuvent même glisser quand le fond est en pente. Au printemps, époque où la tourbière est saturée, on observe que les parois des trous d'exploitation et surtout les couches aqueuses de *Sphagnum* bombent. A d'autres places, on voit la couche inférieure poisseuse (*Hypneto-caricetum*) aplatie et refoulée par la pression des assises supérieures plus compactes, de façon qu'il se forme, sur les parois des fossés d'exploitation, des fentes parallèles pouvant amener l'effondrement de tout un côté[2].

Ces fortes modifications dans le volume de l'humus à la suite des alternatives de sécheresse et d'humidité, surtout de gel et de dégel en hiver, exercent une fâcheuse influence sur les plantes cultivées en les exposant au *déchaussement*. Les plantes ont leurs racines peu à peu soulevées hors de terre ; elle perdent leur assiette, gisent sur le sol et sont tuées par la gelée. C'est pour cela que la culture des plantes hivernantes est exclue des sols très humiques.

---

1. Sitensky, *loc. cit.*, p. 189.
2. *Loc. cit.*, p. 193.

D) La *cohésion* des humus, la force avec laquelle adhèrent leurs particules, est relativement faible. On peut la mesurer par la résistance que le sol oppose à se laisser pénétrer par un instrument tranchant, soit par traction (cohésion relative), soit par pression (cohésion absolue). Des essais faits selon ces deux procédés par H. PUCHNER[1], avec de la tourbe pulvérulente et des sols minéraux artificiels montrent nettement que l'humus possède la plus faible cohésion, l'argile la plus forte, le sable se plaçant entre les deux. Pour rompre un cylindre de terre[2] de 3 centimètres de hauteur et 2 centimètres de diamètre, il a fallu, avec un taux d'eau égal à 60 p. 100, 40 p. 100, 20 p. 100, 0 p. 100 de la faculté d'imbibition totale :

	60 p. 100. — grammes.	40 p. 100. — grammes.	20 p. 100. — grammes.	0 p. 100. — grammes.
Argile	19 224	21 188	23 641	32 949
Sable	4 403	4 679	3 805	775
Humus.	1 292	1 000	542	47

Ces trois éléments principaux des sols se rangèrent dans le même ordre au point de vue de la résistance au couteau. Les poids nécessaires pour faire pénétrer dans le sol un coin d'acier de 2 centimètres de large et 1 centimètre de haut avec une ouverture d'angle de 13° furent les suivants :

Teneur relative des sols en eau.

(La quantité d'eau nécessaire pour l'imbibition complète étant 100.)

	100 p. 100. — grammes.	80 p. 100. — grammes.	60 p. 100. — grammes.	40 p. 100. — grammes.	20 p. 100. — grammes.	0 p. 100. — grammes.
Argile. .	114	2 404	9 537	11 870	15 037	20 037
Sable. .	167	2 937	4 237	5 137	8 370	2 370
Humus .	115	1 404	1 904	1 804	870	487

Si, pour mieux se rendre compte, on prend les moyennes pour tous les états d'humidité des matières employées en supposant la

1. *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik.* Édité par E. WOLLNY. Vol. XII, 1889, p. 195.

2. Les cylindres étaient fabriqués avec des matières saturées puis desséchés jusqu'au taux d'eau voulu. C'est ce qui explique que le sable quartzeux et l'humus séchés à l'air ont pu garder leur forme primitive.

cohésion absolue de l'argile et sa résistance à la rupture égales à 100, on trouve :

	POUR LA COHÉSION ABSOLUE.		POUR LA RÉSISTANCE A LA RUPTURE.	
	Un poids de	Rapport à l'argile.	Un poids de	Rapport à l'argile.
Argile	24 251	100.00	9 833	100.00
Sable	3 415	14.08	3 870	39.36
Humus.	720	2.97	1 097	11.15

Il résulte de ces chiffres que *la cohésion de l'humus est très faible relativement à celle des autres éléments du sol et surtout de l'argile.*

Les données précédentes ne s'appliquent qu'à l'humus pulvérulent qui se trouve en mélange dans le sol ou plus ou moins divisé par l'érémacausis ou par une opération mécanique. Dans les dépôts importants, tels que les tourbières, la cohésion de l'humus s'écarte sensiblement de ce qui vient d'être dit. Tant que la tourbe forme une masse continue, elle est toujours molle à l'état humide, mais elle devient plus dure à mesure qu'elle se dessèche. Le durcissement de la tourbe par le dessèchement est en général d'autant plus accusé qu'est plus forte la contraction, c'est-à-dire l'humification et la pression supportée par les couches. Au reste, la consistance de la tourbe dépend des plantes qui la forment, de son mélange avec les parties du sous-sol, des éléments minéraux qui ont été charriés ou des mélanges qui se sont produits par intervalles. Le mélange d'éléments minéraux fait subir à la tourbe une diminution de cohésion ; quand de la pyrite est répartie dans la masse, une tourbe assez compacte se fragmente si elle est restée exposée un an à l'air et que le sulfure soit décomposé ; elle prend une texture pulvérulente.

E) L'*adhérence* de l'humus, sa propriété d'adhérer plus ou moins aux instruments en bois ou en fer, est relativement faible et ne peut se constater que dans les sols saturés.

D'après les essais de J. Schachbasian[1], pour faire tomber une plaque de 100 centimètres carrés reposant à plat, il a fallu les poids

1. *Forschungen, etc.*, vol. XIII, 1890, p. 193.

suivants, avec un taux d'eau de 100 p. 100, 80 p. 100, 60 p. 100 du pouvoir maximum d'imbibition :

	100 p. 100.	80 p. 100.	60 p. 100.
	grammes.	grammes.	grammes.
Sur de l'acier poli :			
Argile.	3 347,4	5 212,8	3 623,6
Sable	1 956,8	0	0
Humus	1 492,6	0	0
Sur du bois :			
Argile.	3 997,0	4 362,0	1 954,0
Sable	1 653,2	0	0
Humus	1 349,6	0	0

Il en résulte que *l'humus n'adhère à l'acier et au bois que quand il est saturé et avec une force bien moindre que l'argile, voire que le sable.*

F) Les essais concordants de J. SCHACHBASIAN[1] ont établi que le *coefficient de frottement*[2] pour la tourbe était intermédiaire entre ceux du sable et de l'argile et qu'il diminuait avec le taux d'humidité, comme le montrent les chiffres suivants :

SURFACE DE FROTTEMENT.	COEFFICIENT DE FROTTEMENT. Argile.	Humus.	Sable.
		A l'état humide.	
Acier poli	0,4335	0,6545	0,8250
Bois	0,5345	0,5110	0,8120
		A l'état sec.	
Acier poli	0,3320	0,3930	0,3830
Bois	0,4195	0,4810	0,5860

G) Le *poids spécifique* (rapport du poids du corps à un égal volume d'eau pris pour unité), déterminé au pycnomètre en employant la pompe à air, a été trouvé, dans mes essais[3], de 1,462 pour l'humus[4],

1. *Forschungen, etc.,* vol. XIII, 1890, p. 214.
2. C'est le nombre qui exprime le rapport du frottement à la pression.
3. *Forschungen, etc.,* vol. VIII, 1885, p. 341.
4. Tourbe pulvérulente traitée par l'éther et l'alcool, reprise par l'acide chlorhydrique.

de 2,503 pour l'argile et de 2,622 pour le sable. D'autres recherches ont donné des résultats semblables, comme en témoignent les chiffres suivants :

	Poids spécifique		
	de l'humus.	de l'argile.	du sable.
D'après G. Schübler[1]. . . .	1,370	2,533	2,653
D'après C. Trommer[2]. . . .	1,246	2,452	2,739

Donc, parmi les éléments constitutifs du sol, l'humus possède une densité notablement moindre que les principes minéraux. Les humus naturels ont une densité plus grande à mesure qu'ils sont plus mélangés d'autres substances. Plus une tourbe est riche en cendres, plus forte est sa densité et réciproquement. Ce qui contribue surtout à l'élever, c'est la présence des sels de fer si lourds, tels que le fer des marais dont la densité varie de 3,4 à 4,5 et la pyrite qui va de 5,0 à 5,2.

II) La *densité apparente* de l'humus s'éloigne encore beaucoup plus de celle des éléments minéraux du sol que le poids spécifique. Pour celui-ci, on ne considère que le volume plein du sol sans les vides qui séparent les particules, tandis que la densité apparente tient compte de ces vides. Ceux-ci étant extrêmement nombreux, vu la texture poreuse de l'humus dont le poids spécifique est déjà faible, la densité apparente de l'humus devient minime. Pour les principaux éléments du sol chimiquement purs supposés séchés à l'air et en couches modérément compactes, j'ai trouvé les nombres ci-dessous[3] :

Densité apparente		
Humus.	Argile.	Sable.
0,3349	1,0108	1,4485

La densité apparente de l'humus est donc trois et quatre fois plus petite que celle de l'argile et du quartz. Naturellement elle se mo-

1. G. Schübler, *Grundsätze der Agrikulturchemie*. 2e édition, Leipzig, 1838, 2e vol., p. 61.

2. C. Trommer, *Die Bodenkunde*, Berlin, 1857, p. 258.

3. *Forschungen, etc.*, vol. VIII, 1885, p. 349.

difie suivant la cohérence plus ou moins grande des particules et suivant le degré de décomposition qui augmentent ou diminuent le poids spécifique. Des modifications se produisent dans le même sens par les éléments minéraux mélangés à l'humus et dont la densité est beaucoup plus forte que celle de l'humus. Pour ces motifs, il n'est pas étonnant que la densité apparente des humus naturels soit parfois plus faible, mais généralement plus élevée que les chiffres ci-dessus ; on constate le mieux ces écarts en comparant les densités apparentes des différentes variétés de tourbe.

D'après F. Sitensky [1], les tourbes non ou très peu décomposées et formées soit de sphaignes, soit d'eriophorums et de sphaignes, ont une densité apparente de 0,18 à 0,27 prise sur la substance séchée à l'air. Elle est un peu plus grande pour la tourbe faiblement humifiée faite d'hypnums et de carex (0,25-0,34). Les tourbes brunes, plus fortement humifiées, pures de mélanges minéraux, telles que la plupart des tourbières supra-aquatiques ont une densité apparente moyenne de 0,30 à 0,60. Ce sont les vieilles tourbes infra ou supra-aquatiques plastiques, plus ou moins dures à l'état sec et souillées par le mélange des éléments minéraux du sous-sol, qui présentent les chiffres les plus élevés (0,90-1,50).

Les formations tourbeuses renfermant du fer des marais ont une densité apparente qui dépasse 2.

D'après les recherches de M. Fleischer [2], la densité apparente, prise sur la matière complètement sèche, varie, pour l'humus de bruyère qui se trouve à la surface des tourbières à sphaignes jusqu'à 15 centimètres de profondeur, entre 0,107 et 0,211 ; la moyenne de 39 essais a donné 0,140 ; la tourbe de sphaigne oscille entre 0,048 et 0,098.

L'humus saturé d'eau a une densité bien plus élevée qu'à l'état sec ; l'eau exerce sur cette substance une influence beaucoup plus grande que sur les autres éléments du sol ; cela va de soi, puisque l'humus est de tous celui qui possède la plus grande faculté d'imbi-

---

1. F. Sitensky, *Uber die Torfmoore Böhmens,* Prag, 1891, p. 195.

2. M. Fleischer, *Landw. Jahrbücher,* par H. Thiel, vol. XX, 1891, p. 378 et suivantes.

bition. Les nombres suivants, tirés de mes expériences, mettent ce fait en lumière :

	DENSITÉ APPARENTE		AUGMENTATION du poids par humectation.
	à l'état sec.	à l'état saturé.	
Humus[1]	0,3565	1,1024	209,2 p. 100
Argile	1,0395	1,6208	55,9 —
Sable	1,4508	1,8270	25,9 —

F. SITENSKY a constaté des différences semblables, comme le montrent les chiffres ci-dessous :

	DENSITÉ APPARENTE	
	à l'état sec.	à l'état humide.
Humus de sphagnum	0,125	0,893
Humus de sphagnum et polytric	0,18	0,73
Humus de callune et d'airelle	0,40	0,61

M. FLEISCHER a trouvé pour 39 échantillons d'humus de bruyère une densité apparente moyenne de 0,140 à l'état sec et 0,869 à l'état humide.

I) Quant à la *facilité de culture* des sols humiques, on peut la préjuger d'après les propriétés décrites aux paragraphes D, E, F, H. Parmi les résistances qu'il y a à surmonter dans le travail mécanique des terres, il faut surtout considérer la cohésion, la ténacité, le frottement et le poids.

D'après ce qui vient d'en être dit, on peut les représenter d'une manière approchée de la façon suivante :

	ARGILE.	SABLE.	HUMUS.
Cohésion	forte	faible	faible
Ténacité (60 % du pouvoir maximum d'imbibition)	forte	faible	faible
Frottement (sur acier et bois)	faible	fort	moyen
Densité apparente	moyenne	forte	faible

En somme, dans le travail du sol, *l'humus offre les plus faibles résistances, l'argile les plus fortes et le sable se place entre les deux.*

1. Tourbe pulvérisée, traitée par l'acide chlorhydrique et le mélange d'éther et d'alcool.

b) *Rapports de l'humus avec l'eau.*

La quantité d'eau du sol dépend d'un certain nombre de propriétés physiques dont chacune doit ici être étudiée de près, si l'on veut comprendre les processus compliqués qui se passent dans la nature.

A) *Circulation de l'eau dans le sol.* — Comme tous les corps poreux, les divers humus ont la propriété de conduire l'eau à l'état capillaire. Elle s'y meut ainsi, lentement d'ordinaire, surtout si la masse est compacte [1] ; à mesure que le taux d'humidité augmente, les conduits capillaires se rétrécissent sensiblement par suite de l'augmentation de volume des particules. Dans ces conditions, la circulation capillaire y est plus lente que dans l'argile qui, de tous les éléments minéraux des sols, oppose le plus de résistance au mouvement de l'eau. Quand les particules sont en couches plus meubles, que la substance est à l'état pulvérulent, la circulation est notablement activée, mais n'atteint pas encore la vitesse qu'elle a dans le sable quartzeux, tout en étant supérieure à celle de l'argile [2]. En ce qui concerne la vitesse de circulation, ce qui influe surtout c'est la texture plus ou moins compacte. L'humus exerce une influence marquée sur la hauteur à laquelle l'eau peut s'élever; pourtant c'est seulement dans certains cas et dans des circonstances favorables que l'humus pur, d'après les observations faites jusqu'ici, pourrait élever l'eau par capillarité à plus de 1^{m},50 ou 2 mètres de hauteur.

La circulation capillaire ne se produit qu'avec un taux d'eau assez élevé. Elle cesse dans l'humus quand le sol ne contient plus qu'environ la moitié de son taux d'eau maximum, et elle est remplacée par un mouvement beaucoup plus lent provoqué par le passage d'une particule à l'autre de l'eau retenue énergiquement à leur surface. Quand la couche d'eau qui entoure chaque particule descend au-dessous d'une certaine limite, toute circulation s'arrête.

---

1. H. v. Klenze, *Landw. Jahrbücher,* 1877, 1er fascicule.
2. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. VIII, 1885, p. 209.

La pénétration de l'eau dans la masse, son mouvement de haut en bas, se fait aussi très lentement dans l'humus.

Dans les couches saturées, les pores se rapetissent par gonflement des molécules et opposent au mouvement de l'eau une énergique résistance. Quand les couches sont plus meubles, qu'elles possèdent d'assez gros interstices, l'infiltration de l'eau est plus prompte.

Dans les dépôts naturels d'humus (tourbières), la circulation de l'eau ne se fait remarquer que quand la tourbe s'est éloignée du plan d'eau par les progrès de son accroissement ou quand ce niveau des eaux souterraines s'est abaissé par le dessèchement. Dans ces conditions, la capillarité est extrêmement variable ; elle dépend des plantes qui ont formé l'humus et de leur degré de décomposition.

En général, la tourbe des tourbières à sphaignes est, toutes circonstances égales, capable de pomper l'eau à un bien plus haut degré que celle des tourbières infra-aquatiques. Ces différences tiennent surtout à la structure anatomique des plantes.

Comme nous l'avons dit plus haut, les tiges de sphagnums des tourbières supra-aquatiques forment un amas de tubes cylindriques extrêmement étroits qui conduisent très bien l'eau grâce à leur grande capillarité. Ces tiges se ramifiant chaque année deviennent toujours plus drues. L'eau y est bien mieux pompée que dans les tourbières infra-aquatiques, où manquent les cellules capillaires des tiges et où le nombre des tubes capillaires est beaucoup plus restreint. Du reste, la circulation de l'eau dans la tourbe des deux groupes de tourbières peut être différente ; elle dépend, disions-nous, tant de la structure et de la densité des plantes formatrices que de leur degré de décomposition. *Quand cette décomposition est peu avancée, l'eau circule bien mieux que dans le cas contraire. La pulvérisation mécanique de la tourbe favorise singulièrement la capillarité et d'autant plus que les fragments sont plus fins.* Ce fait est de grande importance pour la culture de ces sols, comme on le montrera dans le troisième chapitre.

B) La *faculté d'imbibition* est la propriété que possède le sol de retenir l'eau plus ou moins avidement. Ces quantités d'eau s'expri-

ment utilement en pour-cent du volume du sol pour des raisons qui ne peuvent trouver place ici[1].

L'eau, après cessation de tout mouvement, est retenue dans le sol tant par l'attraction de surface que par la force capillaire et par l'absorption qu'exercent les substances colloïdales.

Si l'on examine une tranche de sol humide quand toute circulation y est arrêtée, on voit que le taux d'eau augmente de haut en bas et devient constant à partir d'une certaine limite, quand la tranche de sol est suffisamment épaisse. La cause de ce fait tient à ce que l'eau dans les couches superficielles n'est retenue que par l'attraction de surface et les plus fins capillaires, tandis que les espaces moins étroits se vident. Plus la couche est profonde, plus il y a de pores assez larges qui contribuent à retenir l'eau jusqu'à ce qu'enfin, dans la partie la plus basse, des colonnes d'eau se forment même dans les larges vides ; alors le sol est saturé. C'est en se fondant sur cette observation que l'on distingue une faculté d'imbibition absolue ou minima qui est celle des couches superficielles, dans les sols profonds, due à l'intervention des plus fins capillaires et une faculté d'imbibition complète ou maxima pour laquelle tous les espaces capillaires du sol sont remplis d'eau.

Voici d'ailleurs les différences que j'ai trouvées pour les principaux éléments du sol[2] à l'état pur et pulvérulent :

Faculté d'imbibition en pour-cent du volume.

	MAXIMA.	MINIMA.
Humus	74.59	55.35
Argile	58.13	53.19
Sable.	37.62	33.04

Ces chiffres prouvent que *la faculté d'imbibition est la plus forte pour l'humus, ensuite pour l'argile et qu'elle est la plus faible dans le sable.*

Cette faculté extraordinaire d'imbibition de l'humus, qui ressort des chiffres précédents, est due, d'une part, à la ténuité de ses ca-

1. A. MAYER, *Landw. Jahrbücher*, 1874, p. 753, et FUHLING'S *Landw. Zeitung*, 1875.
2. *Forschungen auf dem Geb. der Agriculturphysik*, vol. VIII, 1885, p. 195 et 198.

pillaires, d'autre part, à la porosité des éléments du sol et à sa teneur en substances colloïdales. Les particules résultant de la décomposition des végétaux sont comme traversées par des capillaires très fins, qui absorbent énergiquement l'eau à leur portée. Il en est de même des substances colloïdes qui, en s'imbibant, augmentent de volume et diminuent le diamètre des capillaires en les comprimant, d'où résulte un ralentissement du courant.

Bien que la faculté d'imbibition des humus qui existent dans la nature en grande masse (tourbières) soit aussi très élevée, elle oscille pourtant dans de larges limites. Ces différences dépendent surtout des propriétés des plantes constituant l'humus, du degré de décomposition et de pulvérisation de la masse, et enfin de sa compacité.

On peut s'en rendre compte d'ailleurs en constatant que la tourbe des tourbières à sphaignes possède une faculté d'imbibition supérieure à celle de la tourbe des tourbières infra-aquatiques formée surtout de carex.

Dans la première, entre en ligne de compte non seulement la capillarité déjà mentionnée des tiges de sphaignes, mais encore la faculté d'imbibition de leur enveloppe, notamment des cellules hyalines des feuilles, dont les pores nombreux permettent la pénétration facile de l'eau qui y est retenue grâce aux fibres en bandelettes ; tandis que dans la seconde catégorie de tourbes, toutes ces conditions manquent. Pour montrer à quel point diffèrent les facultés d'imbibition des tourbes hautes et des tourbes basses, il n'y a qu'à consulter mes chiffres ci-dessous. Les matériaux utilisés pour mes recherches se trouvaient à l'état compact et finement pulvérisés ; ils furent employés de telle façon que, toutes choses égales d'ailleurs, les chiffres obtenus expriment la faculté moyenne d'imbibition.

Faculté d'imbibition.

VARIÉTÉS DE TOURBES :	VOLUME p. 100.	POIDS p. 100.
Tourbières hautes : —	—	—
Tourbe de Oldenbourg, peu décomposée, fine (< 1mm) .	78.6	454.0
Tourbe de Oldenbourg, peu décomposée, fine (< 1mm) .	70.3	497.2
Tourbe de Oldenbourg, peu décomposée, fine (< 1mm) .	81.8	621.6
Tourbe de Oldenbourg, peu décomposés, grosse (> 4mm).	79.7	465.2
Tourbière de Haspel (*Mull*), plus décomposée, fine (< 1mm)	70.3	339.4

VARIÉTÉS DE TOURBES :	VOLUME p. 100.	POIDS p. 100.
Tourbières basses : —	—	—
Tourbière de Schleissheim, très décomposée, fine (> 1^{mm}).	55.5	128.8
Tourbière de Schleissheim, très décomposée, fine (> 1^{mm}).	62.4	149.7
Tourbière de Schleissheim, très décomposée, fine (> 1^{mm}).	55.2	163.5
Tourbière de Schleissheim, très décomposée, grosse (> 4^{mm})	66.6	152.1
Tourbière du Danube, très décomposée, fine (< 1^{mm}) .	67.2	153.1

D'après ces chiffres, *les tourbes des tourbières hautes ou supra-aquatiques possèdent une faculté d'imbibition supérieure à celle des tourbes des tourbières basses.* Les matériaux employés ayant été complètement séchés au préalable absorbaient beaucoup moins d'eau que s'ils avaient été humides ; les chiffres précédents ne donnent donc que les différences relatives entre les deux sortes de tourbes et nullement des valeurs absolues. En réalité et dans les conditions naturelles, la faculté d'imbibition absolue est beaucoup plus grande. La tourbe de sphaignes non ou peu décomposée peut, dans certaines circonstances, absorber de 1000-2000 p. 100 d'eau en poids, tandis que dans les mêmes conditions la tourbe infra-aquatique n'en absorbe que de 350-600 p. 100[1]. On voit donc que la faculté d'imbibition peut beaucoup varier pour les deux espèces de tourbe. Ceci s'explique très simplement par les différences entre les plantes qui les constituent et par les différences dans leur état et leur végétation.

La faculté d'imbibition de la tourbe diminue à mesure que progresse la décomposition de ses végétaux. Cette assertion de prime abord paraît plutôt bizarre, et en réfléchissant qu'avec l'humification il se produit une quantité de substances colloïdales attirant l'eau,

1. Les différences dans les facultés d'imbibition relativement au volume sont naturellement beaucoup plus légères, puisque les taux sont toujours inférieurs à 100. Une tourbe de sphaignes peu décomposées, par exemple, peut contenir sous une densité apparente de 0,050, 10 p. 100 d'humidité hygroscopique, et sous un poids spécifique de 0,3,98.50 volumes d'eau pour 100 volumes (état de saturation). La faculté d'imbibition est donc en volumes de 98.5 p. 100, tandis que, suivant la densité, dans les mêmes circonstances, elle est de 1.973 p. 100. Dans les mêmes conditions, la faculté d'imbibition avec une densité apparente de 0,150 serait, rapportée au volume, de 95.52 p. 100 et, rapportée à la densité, de 637 p. 100. A saturation, le volume d'eau absorbé est d'autant plus petit que l'espace occupé par les particules solides est plus grand, c'est-à-dire que, sous volume égal, la faculté d'imbibition de l'humus est inversement proportionnelle à sa densité apparente.

on serait porté à admettre le contraire. Cependant, il est connu que ce sont les plantes intactes ou peu décomposées qui possèdent au plus haut degré la propriété d'absorber l'eau. Au fur et à mesure qu'elles se détruisent et deviennent amorphes, leur faculté d'imbibition subit une diminution qui ne peut être compensée par l'accroissement concomitant, mais peu important, des substances colloïdales.

A côté du degré de décomposition des végétaux, la densité de la tourbe ainsi que son émiettement ont aussi leur influence sur la faculté d'imbibition. *Plus la tourbe est dense, plus, à égalité de composition, sa faculté d'imbibition est faible, et réciproquement.* Par une pulvérisation mécanique on augmente d'autant plus cette propriété que les particules sont plus fines.

Dans une tourbe pulvérisée en partie amorphe, renfermant encore des feuilles de sphaignes non décomposées, la faculté d'imbibition sera d'autant plus grande qu'il y aura plus de feuilles et de cellules corticales de sphaignes dont l'humification sera peu avancée ; ceci s'explique par la structure des sphaignes (F. SITENSKY). Cette dernière espèce de tourbe absorbe, grâce à son état meuble, proportionnellement à sa densité, plus d'eau que la tourbe plus compacte, ce que prouvent d'ailleurs mes chiffres.

Faculté d'imbibition en pour-cent du poids

	TOURBE			
	d'Oldenbourg.	de Haspel.	de Schleissheim.	
	fine. p. 100.	fine. p. 100.	fine. p. 100.	grossière. p. 100.
Couche meuble.	599.9	483.5	202.3	181.4
Couche compacte. . . .	497.2	339.4	163.5	152.1

La faculté d'imbibition rapportée au volume augmente à mesure que les particules sont plus serrées ; voici mes chiffres :

Faculté d'imbibition en pour-cent du volume.

	TOURBE			
	d'Oldenbourg.	de Haspel.	de Schleissheim.	
	fine. p. 100.	fine. p. 100.	fine. p. 100.	grossière. p. 100.
Couche meuble.	64.4	68.4	54.7	59.3
Couche plus compacte. . .	70.3	70.3	55.2	66.6

La faculté d'imbibition varie encore suivant le taux d'humidité de

la tourbe. En général, plus elle est sèche, plus l'absorption est difficile. Tandis que les matières peu ou pas décomposées, malaxées avec l'eau, s'en saturent, quoique lentement, la tourbe fortement humifiée n'absorbe pas d'eau quand elle est sèche ; elle devient *inimbibable*. On peut s'en convaincre dans les tourbières fortement desséchées dont les couches amorphes ne s'imbibent jamais. Elles ne font pas remonter l'eau des couches inférieures et les précipitations atmosphériques s'infiltrent à travers les vides non capillaires sans humecter leurs parois. La cause de ce phénomène est encore peu connue. Il est probable que les éléments de la tourbe desséchée sont recouverts d'une fine couche de résine, qui empêche l'imbibition[1]. Enfin il ne faut pas oublier que la gelée provoque dans les sols tourbeux humides des modifications liées à une diminution de la faculté d'imbibition. D'après Fleischer[2] un échantillon de sol tourbeux qui contenait 1 631 grammes d'eau a perdu après la première gelée 125 grammes et après la seconde 25 grammes, soit en tout 150 grammes d'eau ou 9.1 p. 100 de son taux primitif. Plus les vides produits par la gelée dans la tourbe sont grands, plus sa faculté d'imbibition diminue.

C) La *perméabilité* (à l'eau), c'est-à-dire la quantité d'eau capable de filtrer dans un temps donné à travers une couche de sol d'épaisseur déterminée est extrêmement faible pour l'humus pulvérisé. La quantité de liquide exprimée en litres, filtrée dans l'espace de 10 heures sous une pression de 100 centimètres cubes d'eau, à travers une couche de 30 centimètres de haut et de 19,634 centimètres carrés de section est, suivant mes recherches, pour les tourbes de[3] :

	GROSSEUR DES PARTICULES en millimètres.	
Aibling (Bavière du Nord).	0,01-0,114	0,0182
Oldenbourg.	0,01-0,250	0,2582
Argile (kaolin)	»	0,000
Sable calcaire	0,01-0,250	2,586

1. Lorenz, *Drittes Programm des K. K. Gymnasiums*. Salzburg, 1853. Moore von Salzburg. Flora 1858. Wiegmann (*Uber die Entstehung, Bildung und das Wesen des Torfes*, Braunschweig, 1837, p. 17) fait observer que l'acide humique complètement sec n'est que très difficilement soluble dans l'eau.

2. M. Fleischer, *Landwirthschaftliche Jahrbücher*, vol. XX, 1891, p. 784.

3. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XIV, 1891, p. 16.

Donc l'humus pulvérisé est presque imperméable à l'eau. La perméabilité augmente avec le volume des particules, mais elle n'atteint jamais celle des sols minéraux à particules égales. La cause de cette propriété de l'humus est sans contredit celle-ci : par suite de l'imbibition, les particules gonflent et s'étendent en tous sens au détriment des espaces capillaires qui se rétrécissent et finissent même parfois par s'oblitérer complètement. Dans la nature, où l'humus se trouve en grande masse, comme, par exemple, dans les tourbières, la perméabilité est en général un peu plus grande que ne l'indiquent les chiffres ci-dessus, parce que d'abord il existe dans la masse de grands espaces qui se vident rapidement et que, par la dessiccation, il se forme d'autres vides dus à la contraction de la matière. La perméabilité dépend d'ailleurs de la densité plus ou moins grande de la masse. Ainsi, moins la tourbe est dense, plus les quantités d'eaux filtrantes sont grandes, et *vice versa*.

D) La *faculté d'évaporation* se mesure par la quantité d'eau que l'unité de surface évapore dans l'atmosphère. Elle dépend, d'une part, de la richesse du sol en humidité, d'autre part, de la manière suivant laquelle cette dernière est remplacée à la surface par capillarité. En considérant que l'humus a une faculté d'imbibition très grande et une conductibilité faible, mais suffisante pour élever l'eau à d'assez grandes hauteurs, on comprendra que l'évaporation acquiert une certaine importance dans les sols humiques. On peut d'ailleurs s'en convaincre en jetant un coup d'œil sur les chiffres suivants[1] qui montrent en même temps les différences avec les autres éléments des sols à l'état finement pulvérisé :

Quantité évaporée par 1 000 centimètres carrés exprimée en grammes.

SOLS DRAINÉS.	TOURBE.	ARGILE.	SABLE.
Du 5 juin au 6 juillet 1883.	7 078	5 248	4 465
Du 11 septembre au 17 octobre 1883. ..	4 442	4 172	3 328

On voit donc d'après ces résultats que *l'humus est de tous les éléments des sols celui qui possède la plus grande faculté d'évaporation*. Ceci, d'après d'autres observations, n'arrive que quand, comme

1. C. Eser, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 81.

dans les recherches précédentes, la couche de sol est peu épaisse[1] et finement pulvérisée. Mais *lorsqu'elle est plus épaisse et que les grains sont plus gros, l'humus s'évapore moins* que l'argile, car en ce cas il ne conduit plus assez rapidement l'eau à la surface et ses grandes lacunes en ralentissent encore l'ascension[2]. C'est ce qui arrive par la dessiccation des couches superficielles. Dès qu'elles sont desséchées, l'influence des facteurs de l'évaporation sur l'humidité du sol diminue considérablement[3]. Cet assèchement des couches superficielles ne se montre que quand la richesse en eau du sol est tombée à 50 p. 100 environ de sa faculté d'imbibition maxima et que l'ascension par capillarité a cessé. L'évaporation est d'autant plus favorisée, au contraire, que le sol contient plus d'eau au delà de cette limite. En se basant sur ces phénomènes, on explique facilement le fait suivant. A la suite d'une dessiccation prolongée, l'évaporation d'un sol humide diminue constamment pour arriver à un minimum, dès que l'action de la capillarité s'arrête, par diminution de la provision d'eau en dessous d'une limite déterminée. Cette couche superficielle desséchée protégeant ainsi le sol contre une dessiccation plus profonde, fait que, s'il est nu, son taux reste désormais constant et assez considérable.

A côté de la grosseur des particules constituant l'humus, leur degré de cohésion joue aussi un rôle au point de vue de l'évaporation. Elle est d'autant plus forte que la masse est plus dense et la conductibilité plus grande et réciproquement. Lorsqu'il y a saturation, les différences entre les facultés d'évaporation des diverses espèces de sols disparaissent, puisque chacun est, dans ces conditions, pourvu à peu près de la même dose d'humidité et fournit à l'évaporation des quantités égales[4].

E) L'*influence globale des facteurs de l'humidité du sol* se fait sentir dans la nature différemment, suivant l'état de l'atmosphère. Par un temps humide, le sol, après avoir absorbé la quantité d'eau que

1. 10-20 centimètres.
2. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 283.
3. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 325.
4. C. Eser, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 81. — E. Wollny, *Landwirthschaftliche, etc.*, vol. V, 1876, p. 457.

lui permet sa faculté d'imbibition, laisse filtrer le surplus dans la profondeur. Par un temps sec, au contraire, le sol perd par l'évaporation une plus ou moins grande quantité d'eau d'imbibition qui est exactement remplacée jusqu'à saturation par les pluies qui surviennent, leur surplus s'écoulant toujours dans la profondeur. De là des variations et des oscillations continuelles du degré d'humidité du sol, dépendant de sa composition physique et de l'état atmosphérique. Mes recherches[1] au moyen du lysimètre en donnent une idée suffisante.

Taux moyen d'eau, en pour-cent du volume, jusqu'à une profondeur de 0m,30.

	TOURBE.	LEHM.	SABLE.
Du 1er avril au 30 septembre 1882. .	43.90	34.35	11.68
Du 5 avril au 30 septembre 1884. . .	42.12	34.23	12.34
Moyennes des 2 années. . . .	**43.01**	**34.29**	**12.01**
Taux relatifs	3.58	2.85	1

Nous voyons donc, d'après ces chiffres, que *l'humus* (*tourbe*) *contient le plus d'eau ; vient ensuite l'argile et en dernier lieu le sable.* La tourbe contient trois fois et demie, l'argile presque trois fois plus d'eau que le sable.

Évidemment, la faculté d'imbibition est de la plus haute importance pour la teneur du sol en eau ; on peut déjà le prévoir d'après ce fait que les matériaux employés dans les recherches précédentes se rangent d'après leur taux d'eau en volume dans le même ordre que d'après leur faculté d'imbibition. Plus celle-ci est grande, plus l'infiltration dans les couches profondes diminue nécessairement et *vice versa.* C'est pour cela que la quantité d'eau qui s'infiltre dans les sables est supérieure à celle qui s'infiltre dans l'humus et dans l'argile. L'inverse a lieu pour l'évaporation, puisque les pertes d'eau par la surface augmentent ou diminuent avec le taux d'eau du sol et que les couches superficielles se dessèchent dans le même rapport d'autant plus lentement ou d'autant plus vite et protègent plus ou moins efficacement les couches sous-jacentes contre l'évaporation.

Les deux facteurs, filtration, évaporation, qui avec la faculté d'imbibition règlent le taux d'eau du sol, varient suivant la composition

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVIII, 1895, p. 36.

mécanique des matériaux. Dans le sable, la filtration l'emporte sur l'évaporation, tandis que le contraire a lieu dans l'humus et dans l'argile. Cela résulte clairement de la comparaison des résultats obtenus ci-dessous :

	TOURBE.	LEHM.	SABLE.
1882 :	cent. cubes.	cent. cubes.	cent. cubes.
Évaporation par surface de 400 centim. carrés.	13 216	15 718	7 893
Infiltration par surface de 400 centim. carrés sur 0m,3 de profondeur	10 415	5 395	16 638
1884 :			
Évaporation par surface de 400 centim. carrés.	11 186	14 373	7 198
Infiltration par surface de 400 centim. carrés sur 0m,3 de profondeur	8 888	5 991	13 256

De ces chiffres il ressort nettement qu'en moyenne, abstraction faite de la marche de l'humidité du sol, les effets de l'évaporation et de la perméabilité se contre-balancent, c'est-à-dire qu'à l'augmentation de l'un fait contrepoids la diminution de l'autre, de telle sorte que les sommes de ces chiffres sont égales et que, par suite, la faculté d'imbibition trouve sa principale expression dans la provision d'humidité du sol.

Pour bien apprécier ces rapports, il ne faut pas oublier que dans un seul et même genre de sol l'humidité est régie par la grosseur des grains [1]. La tourbe à gros grains, employée dans les recherches précédentes, aurait eu un taux d'eau plus élevé si les particules avaient été plus fines. De même, l'argile pure, formée des plus fines particules du sol, aurait eu une faculté d'imbibition plus grande que le lehm employé à sa place. Il est certain enfin que, pour le sable aussi, les résultats auraient été différents avec des éléments plus fins. Donc pour avoir une image exacte des rapports de chaque sol avec l'eau, il faut tenir grand compte de son état mécanique. Les différences respectives seront, dans chaque cas concret, en partie autres que celles que nous avons trouvées, mais elles présenteront néanmoins les faits dans le même ordre, car, comme nous l'avons montré plus haut, l'humus et l'argile absorbent, en toutes circonstances, plus d'eau que le sable.

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 384.

F) La couverture vivante, on l'a prouvé précédemment avec détails (p. 238), provoque une absorption notable d'eau qui augmente à mesure que les plantes poussent plus serrées et que les circonstances extérieures sont plus favorables à l'évaporation. C'est pour cette raison que, pendant la saison chaude et en l'absence de pluies, l'humidité dans les sols humiques peut descendre, jusqu'à une assez grande profondeur, à un taux nuisible à la végétation d'autant plus facilement que *le degré d'humidité, pour lequel les plantes peuvent végéter le mieux, donner leur maximum de produit, est beaucoup plus haut pour l'humus que pour les autres éléments constituants du sol*. Je l'ai démontré [1] en cultivant une seule et même plante dans trois sols variant par leurs propriétés physiques (sable, lehm, tourbe) et munis d'un taux d'eau variant de la même manière pour chacun des trois sols. La perte d'eau par l'évaporation a été remplacée par des arrosages quotidiens, de sorte que, pendant toute la durée des recherches, le sol de chaque pot avait presque constamment le degré d'humidité indiqué ci-dessous. Voici les résultats :

Orge de printemps (5 plantes).

(Volume du sol : 3 550 centimètres cubes.)

Taux d'eau du sol outre l'humidité hygroscopique.		Tourbe.				Lehm.				Sable.			
		Nombre des grains.	Poids de la récolte en grammes.			Nombre des grains.	Poids de la récolte en grammes.			Nombre des grains.	Poids de la récolte en grammes.		
Vol. p. 100.	Absolu gr.		Grains.	Paille.	Total.		Grains.	Paille.	Total.		Grains.	Paille.	Total.
5	90	0	0,0	0,0	**0,0**	0	0,0	0,0	**0,0**	10	0,3	0,4	**0,7**
10	180	0	0,0	0,0	**0,0**	25	0,4	1,9	**2,3**	75	1,7	2,4	**4,1**
15	270	20	0,4	1,1	**1.5**	48	1.2	1,6	**3,8**	144	3,6	5,3	**8.9**
20	360	33	0,6	2,1	**2,7**	143	3.7	5,5	**9,2**	184	4,1	8.0	**12,1**
25	450	205	5,3	9,2	**14,5**	162	4,3	9,6	**13,9**	216	5.7	12,5	**18.2**
30	540	247	6,1	10,7	**16,8**	161	4,8	10,2	**15,0**	216	5,0	13,2	**19,2**
35	630	294	7,8	14,6	**22,4**	208	5,2	14,1	**19,3**	303	7,6	12.4	**20.0**
40	720	349	9,2	15,6	**24.8**	211	6,0	11,5	**17,5**	301	8.6	14,7	**23,3**
50	900	438	11,4	23,3	**34,7**	274	8,2	16,4	**24,6**	442	10.8	22,7	**33,5**
60	1080	464	12,6	25,9	**38,5**	336	9,3	18,2	**27,5**	317	9,3	16,0	**25,3**

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XV, 1892, p. 427.

D'après ces chiffres, nous voyons nettement que les plantes peuvent végéter et donner une récolte dans le sable déjà avec un taux d'eau de 5 à 15 p. 100 en volume, tandis que dans le lehm et la tourbe ce taux était insuffisant pour faire germer les graines ou les porter à un degré de développement appréciable. Avec 20, 25 et 30 p. 100 d'humidité en volume, le sable l'emportait encore sur les deux autres et ce n'est qu'à partir de 35 p. 100 en volume que le contraire commençait à s'accuser dans les récoltes. Ce qui est remarquable, et que nous voyons d'après les récoltes, c'est que dans le sable avec un taux d'eau de 50 p. 100 on dépasse déjà la teneur correspondant à la récolte maxima, tandis que, pour la tourbe et le lehm, ce n'est qu'avec cette provision d'eau que le maximum de production a été atteint. Nous pouvons donc conclure que, *pour arriver à leur maximum de développement, les plantes végétant dans l'humus* (*tourbe*) *ou dans l'argile* (*lehm*) *exigent une plus forte teneur du sol en eau que dans le sable, toutes conditions égales.*

Pour l'explication de ce phénomène, il est bon de remarquer qu'aux forces en vertu desquelles les plantes puisent l'eau du sol par leurs racines (osmose, faculté d'imbibition du protoplasma des cellules de la racine, etc.) s'opposent celles qui résident dans le sol et qui dépendent de sa structure mécanique (attraction de la part des éléments du sol, capillarité, etc.), si bien que les actions réciproques qui se passent dans la nature en sens divers entre ces forces doivent différer suivant l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par le sol. Celle-ci étant, comme il résulte de ce qui précède, plus élevée pour l'humus et l'argile que pour le sable, les deux premiers éléments offriront une résistance bien plus grande à l'absorption des plantes que le dernier. Ce fait doit être pris en considération tout spécialement au point de vue du dessèchement des sols humiques mouilleux, comme nous le montrerons plus loin.

La dessiccation provoquée par les plantes a, sur les sols d'humus pur (tourbières), non seulement l'inconvénient d'abaisser leur humidité jusqu'à un taux insuffisant au développement des plantes, mais encore elle peut avoir un effet nuisible en ce que le sol, fortement desséché à de grandes profondeurs, persiste dans cet état désavantageux lors de l'arrivée des grandes pluies. N'étant plus imbibable,

il laisse écouler l'eau rapidement à travers ses grands vides sans s'humecter. C'est pour ce motif qu'il faut, lors du desséchement de ces sols, prendre des dispositions qui permettent de maintenir leur humidité dans certaines limites.

c) *Rapports de l'humus avec l'air et les gaz.*

A) La *porosité* s'exprime par le rapport existant entre le volume des vides du sol (pores) et le volume total (= 100). Le volume des pores de l'humus varie dans de larges limites, surtout si ce dernier est à l'état sec, entre 60-85 p. 100. *L'humus séché à l'air possède, en comparaison avec les autres éléments du sol, la plus grande porosité,* comme on peut le voir dans les recherches de A. von Schwarz[1], dont voici les résultats :

Porosité en pour-cent du volume.

TOURBE.	ARGILE.	LEHM.	SABLE.
84.0	52.7	45.1	39.4

Mes recherches[2], faites avec des substances pulvérisées, ont donné les résultats suivants :

TOURBE.	ARGILE.	LEHM.	SABLE.
72.38	57.26	52.99	41.50

Les différences tiennent aux variations de l'état mécanique des matières humiques. La porosité est donc dépendante des propriétés des plantes ou parties de plante constituant l'humus, ainsi que du degré de décomposition et de la densité de la masse. La tourbe de sphaignes est, par exemple, plus poreuse que la tourbe infra-aquatique. Plus la décomposition avance, plus le volume des pores diminue, à mesure que la matière passe à l'état amorphe.

Naturellement, la porosité diminue à mesure que le taux d'eau

1. A. von Schwarz, *Erster Bericht über Arbeiten der K. K. landwirtschaftlich-chemischen Versuchsstation in Wien aus den Jahren* 1870-1877, Wien, 1878, p. 51.

2. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VIII, 1885, p. 369-370.

augmente, et ceci à un degré notable pour l'humus qui, comme nous l'avons vu, peut absorber des quantités considérables d'eau. Voici les chiffres pris dans mes recherches précédemment citées :

Porosité en volume p. 100.

	SÉCHÉE A L'AIR.	AVEC SA FACULTÉ D'IMBIBITION	
		minima.	maxima.
	—	—	—
Tourbe . . .	72.38	29.37	0.0

Le volume des pores de l'humus diminue donc à mesure que le taux d'eau augmente; il est réduit à zéro lorsque l'humus est saturé.

B) La *perméabilité à l'air* se mesure d'après les quantités d'air passant à travers le sol dans des conditions déterminées. Voici ce que j'ai pu trouver[1] comme différences pour les éléments du sol à l'état sec, en expérimentant sur une couche de sol ayant 50 centimètres de haut, 5 centimètres de diamètre sous une pression de 100 millimètres d'eau :

Quantités d'air passées par heures et exprimées en litres.

Kaolin.	0,175
Sable $0^{mm},01$ -$0^{mm},071$	0,390
— 0 ,071-0 ,114.	7,050
— 0 ,114-0 ,171.	15,425
— 0 ,171-0 ,250.	28,000
— 0 ,25 -0 ,50	71,650
— 0 ,01 -2 ,00	3,400
Tourbe	32,740

D'après ces chiffres, on peut conclure que *l'humus desséché à l'air, comparativement aux éléments minéraux du sol, possède une très grande perméabilité, touchant de près celle des gros sables.* La provision en eau du sol a une très grande influence sur sa perméabilité, ce dont on peut se convaincre par les chiffres ci-après. A travers une couche de sol de 50 centimètres de haut, dé 5 centi-

1. WOLLNY, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 202.

mètres de diamètre et sous une pression atmosphérique égale à une colonne d'eau de 50 millimètres, il a passé :

Quantité d'air exprimée en litres par heure en volume p. 100.

	Avec un taux d'eau de					
	0	8.15	16.30	24.45	32.60	40.75
Tourbe d'Oldenbourg en poudre.	16.37	7.86	4.25	1.14	0.03	0.00

La perméabilité diminue donc à mesure que le taux d'eau de l'humus augmente, et elle tombe à zéro avant même que le degré de saturation de ce dernier soit atteint, car la tourbe dans nos recherches pouvait absorber de 60-70 volumes p. 100 d'eau.

La diminution de la perméabilité par suite de l'augmentation du taux d'eau s'explique parce que l'eau prend la place de l'air dans les pores et que, par l'imbibition des substances colloïdes, les pores se rétrécissent.

La perméabilité dépend encore de l'origine, du degré de décomposition et de la densité des éléments de l'humus. La tourbe de sphaignes, non décomposée et peu dense, est plus perméable à l'air qu'une tourbe infra-aquatique qui sera très humifiée et compacte.

C) *Diffusion des gaz à travers le sol.* — Les pores du sol contiennent, outre de l'air atmosphérique et de la vapeur d'eau, divers gaz parmi lesquels l'acide carbonique est le plus important, vu qu'il se trouve dans le sol en plus grande quantité que les autres. L'acide carbonique provient de la décomposition des matières organiques et, suivant que le sol est plus ou moins riche en matières humiques, il existe en quantité variable, mais toujours bien plus grande que dans l'atmosphère. Il n'est donc pas étonnant que, même sans aucune influence extérieure, il y ait un mouvement continuel dans les gaz du sol produit par la diffusion, c'est-à-dire par la tendance du gaz occlus à se mettre en équilibre de tension avec celui de l'atmosphère.

La diffusion de l'acide carbonique, de l'ammoniaque et des autres gaz existants dépend surtout, à température constante, de la somme des pores de la coupe transversale et non de leur grandeur [1]. Aussi,

1. F. Hannen, *Forschungen, etc.*, vol. XV, 1882, p. 6.

plus la somme des volumes des pores est grande, plus les quantités absolues des gaz qui se diffusent sont considérables, et *vice versa*. Toute diminution du volume des pores, comme celle qui arrive par augmentation soit de la densité du sol, soit de son taux d'eau, a pour conséquence une diminution dans la quantité de gaz diffusé.

En ce qui concerne l'humus, on pourra conclure, d'après ces lois générales et d'après ce que l'on sait de la porosité de cet élément, qu'il est très favorable à la diffusion des gaz quand il est sec, et qu'il offre une résistance assez grande, au contraire, lorsqu'il est humide et surtout saturé.

D) La *faculté* que possède le sol *de condenser les gaz* est une propriété moléculaire et, entendue ainsi, elle embrasse toutes les causes qui retiennent les molécules gazeuses dans et sur les corps solides. Il est d'usage de distinguer entre hygroscopicité et absorption des gaz ; mais au fond ce sont des phénomènes identiques.

Si l'on considère que les substances humiques sont douées d'une porosité extraordinaire et offrent par suite aux gaz une très grande surface, on peut prévoir déjà que leur faculté de condenser les gaz, avec lesquels elles sont en contact, atteindra un haut degré d'intensité. En effet, c'est ce qui arrive, comme on peut s'en convaincre d'après les recherches nombreuses faites à ce sujet [1].

L'*hygroscopicité* ou *faculté de condenser la vapeur d'eau* qui se trouve dans l'air est considérable chez l'humus, ainsi que le prouvent les recherches suivantes de A. VON DOBENECK.

Dans l'air saturé, 100 grammes de sol condensent à 0° et sous la pression atmosphérique de 760 millimètres :

	SABLE.	CARBONATE de chaux.	KAOLIN.	HYDROXYDE de fer.	HUMUS.
	0gr,159	0gr,224	2gr,558	15gr,512	15gr,904
ou	197cm3	278cm3	3 172cm3	19 236cm3	19 722cm3

de vapeur d'eau.

1. G. AMMON, *Forschungen, etc.*, vol. II, 1879, p. 1. — A. VON DOBENECK, *Forschungen, etc.*, vol. XV, 1892, p. 163.

D'après ces chiffres, nous voyons que *l'humus dépasse de beaucoup, au point de vue de l'hygroscopicité, tous les éléments minéraux du sol, sauf l'hydroxyde de fer.*

En fait, l'hygroscopicité, dépendant et des agents extérieurs et de la composition de la substance, oscille dans certaines limites. Elle diminue à mesure que la température s'élève et que la tension de la vapeur d'eau augmente. La régularité de la condensation de la vapeur d'eau dans un air saturé n'est modifiée que par ce fait que le taux d'eau absolu augmente avec la température.

Dans ce cas, l'influence de la température est presque compensée par le taux croissant d'humidité de l'air. Mais si ce taux d'eau absolu de l'air reste constant même avec des températures variables, la loi énoncée ci-dessus, relativement à l'influence de la température, garde toute sa valeur. Par température constante l'hygroscopicité augmente avec le taux relatif de l'humidité dans l'air.

La composition de la substance influe sur la quantité d'humidité qu'elle absorbe ; celle-ci est d'autant plus grande que la substance est plus poreuse et plus meuble. C'est pour cela que la tourbe de sphaignes possède en général une faculté de condensation supérieure à la tourbe infra-aquatique, et cette faculté va en diminuant à mesure que la décomposition progresse. Enfin, certains éléments accessoires, les hydrates de fer, de silice et d'alumine notamment, influent aussi sur l'hygroscopicité ; elle est d'autant plus grande qu'ils sont plus abondants [1]. Agissent de même quelques sels [2] qui condensent énergiquement la vapeur d'eau et s'y dissolvent, comme on peut l'observer, par exemple, dans la tourbe contenant du fer oxydulé ou de l'epsomite [3].

D'après ce que nous venons de dire, on comprend que l'humus à l'état sec contient des quantités très variables d'eau hygroscopique et qu'il se comporte à cet égard fort différemment suivant les circonstances extérieures.

D'après F. Sitensky [4], la teneur des différentes tourbes de la

1. E. W. Hilgard, *Forschungen, etc.*, vol. XVIII, 1895, p. 351.
2. F. Sitensky, *loc. cit.*, p. 201.
3. L'epsomite est du sulfate de magnésie naturel.
4. F. Sitensky, *loc. cit.*, p. 208-211.

Bohême oscille entre 4.45 et 15.14 p. 100 et peut s'élever, d'après A. v. Schwarz, à 21.6 p. 100.

Quant à l'importance de l'hygroscopicité pour la végétation, on a souvent soutenu que les plantes pouvaient absorber l'eau par cette voie et se maintenir ainsi en vie surtout dans les périodes de sécheresse. Il existe pourtant une série de motifs qui empêchent d'admettre cette opinion ; d'abord l'impossibilité pour les racines d'absorber la vapeur d'eau condensée, puisqu'elle n'est pas liquide. Ceci ne serait possible que si, par suite d'un fort abaissement de la température, il se produisait une liquéfaction de la vapeur d'eau de l'atmosphère saturée. Des faits de ce genre se voient rarement dans la nature, et seulement sur le sol nu par un fort rayonnement et pendant la nuit, tandis que sous les plantes la température du sol ne s'abaisse pas assez pour amener la liquéfaction de l'eau condensée [1]. En outre, la condensation de la vapeur d'eau n'a lieu, d'après S. Sikorski [2], que dans les couches superficielles (3-5 centimètres), et l'eau condensée pendant la nuit retourne à l'atmosphère pendant le jour par suite de l'élévation de la températare et de la diminution de l'humidité aérienne.

Si déjà les faits exposés montrent clairement que l'idée d'un effet utile de l'hygroscopicité du sol sur la végétation n'est pas exacte, on s'en convainc en examinant de plus près les circonstances suivant lesquelles la condensation de la vapeur d'eau se produit, ainsi que le minimum d'eau nécessaire à l'existence des plantes. Évidemment il ne peut y avoir condensation que lorsque toute l'eau liquide du sol a disparu et que celui-ci est passé à l'état sec. Mais alors les plantes ne peuvent se maintenir en vie, comme le montre le résultat obtenu par R. Heinrich, A. Mayer et d'autres auteurs, d'après lequel les plantes commencent à se faner déjà avec un taux d'eau qui dépasse sensiblement la limite à laquelle se montre surtout l'hygroscopicité.

Les chiffres obtenus dans ma recherche précédente (p. 351) montrent nettement aussi que, dans l'humus par exemple, la végétation n'a été possible qu'en ajoutant 15 p. 100 d'eau en volume au sol

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XV, 1892, p. 111.
2. S. Sikorski, *Forschungen, etc.*, vol. IX, 1886, p. 413.

desséché à l'air et par suite ayant son maximum de pouvoir hygroscopique.

Mais, au reste, l'eau apportée par hygroscopicité est sans signification sur la végétation, parce que, d'un côté, même dans les cas les plus favorables (4 millimètres de hauteur pour l'humus), elle est très petite, insignifiante, relativement au besoin d'eau des plantes, et que, d'autre part, juste aux périodes sèches où une telle humectation pourrait être d'une certaine utilité, la faculté condensatrice du sol, par suite du faible taux d'humidité de l'air et de la température élevée qui règne, se trouve non seulement amoindrie, mais encore le sol rend à l'atmosphère de notables quantités d'eau condensées dans la période précédente. D'après tout ceci, il semble raisonnable d'effacer du tableau des propriétés utiles du sol l'hygroscopicité au point de vue de l'apport d'eau aux plantes.

L'*absorption des gaz* (au sens strict) par l'humus est en général, comme celle de la vapeur d'eau, très élevée. Voici les chiffres trouvés par A. VON DOBENECK pour l'ammoniaque et l'acide carbonique :

A 0° et sous 760 millimètres de pression, 100 grammes de sol absorbent :

	SABLE.	CARBONATE de chaux.	KAOLIN.	OXYDE de fer hydraté.	HUMUS.
Ammoniaque . .	0gr,107 145cm3	0gr,256 320cm3	0gr,721 947cm3	4gr,004 5 275cm3	18gr,452 24 228cm3
Acide carbonique.	0gr,023 12cm3	0gr,028 14cm3	0gr,329 166cm3	6gr,975 3 526cm3	2gr,501 1 264cm3

Si nous comparons les quantités de gaz condensées par chaque espèce de sol, nous voyons que pour l'ammoniaque l'humus d'abord, ensuite l'hydroxyde de fer, possèdent la plus grande faculté condensatrice, le sable et le carbonate de chaux la plus petite, et le kaolin tient le milieu entre ces deux groupes. Pour l'acide carbonique, la faculté condensatrice des sols est moindre que pour l'ammoniaque, mais s'exerce dans le même sens, sauf pour l'hydroxyde de fer qui prend la place de l'humus.

La condensation du gaz des marais (CH^4) et de l'hydrogène sulfuré est, d'après les recherches de G. AMMON, très intense pour l'hydroxyde de fer et l'humus, tandis que les autres éléments cons-

tituants du sol restent de beaucoup en arrière. En réunissant tous ces faits, nous pouvons dire que *l'humus se distingue par sa faculté condensatrice très forte pour l'ammoniaque, le gaz des marais, l'hydrogène sulfuré, et il n'est surpassé par l'hydroxyde de fer que pour les deux derniers gaz.*

Ce que nous venons de dire ne s'applique qu'à la matière complètement sèche et probablement aussi à celle qui est séchée à l'air. Il reste à déterminer quelles seront les différences avec une substance humide. Les recherches de A. VON DOBENECK ont montré que l'absorption de l'acide carbonique, relativement faible dans le sol sec, diminue jusqu'au minimum lorsqu'il est humide, et qu'au contraire la condensation de l'ammoniaque est extraordinairement augmentée dans cette dernière condition. Voici les chiffres :

A 20° centigrades, 100 grammes de sol condensent :

	SABLE.	$CaCO^3$.	KAOLIN.	HYDROXYDE de fer.	HUMUS.
	—	—	—	—	—
A l'état sec.	0gr,055	0gr,130	0gr,422	2gr,649	10gr,515
A l'état humide	12 ,21	12 ,28	11 ,79	23 ,53	38 ,85

Donc, avec l'état humide des substances, les quantités de gaz absorbées sont très supérieures à ce qu'on trouve à l'état sec. Ici aussi l'humus est en tête des autres éléments. L'influence, exercée ici par l'humidité, tient surtout à ce que le gaz ammoniac est absorbé par la solution du sol. Lorsque les éléments sont humides, la condensation du gaz dans l'eau du sol vient prendre la place de celle produite par les forces physiques.

d) *Rapports entre l'humus et la chaleur.*

Les sources de chaleur du sol sont : la chaleur produite par les processus chimiques ou la condensation des gaz, la chaleur centrale de la terre et enfin la chaleur venant du soleil.

La chaleur produite par l'érémacausis des matières organiques est, comme nous l'avons vu plus haut (p. 10), insuffisante pour produire une élévation notable de la température du sol. C'est seulement quand les matières organiques sont en grande quantité et facilement

décomposables (par exemple : fumier de cheval, plantes vertes fanées, plantes sèches humectées) que, par suite de la décomposition, il se produit une élévation notable de la température; elle peut être utile dans les cultures sur couches ou dans la dessiccation des fourrages (foin brun).

Au point de vue de la chaleur du sol, celle qui est produite par l'arrivée de l'eau ou par la condensation des gaz et de la vapeur d'eau est encore bien moins importante que celle qui se développe dans l'érémacausis, bien que cette dernière puisse être momentanément assez élevée, surtout dans l'humus qui, à ce point de vue, surpasse tous les autres éléments du sol. C'est ainsi que, par exemple, les recherches de A. STELLWAAG[1] nous donnent pour :

ÉLÉMENTS DU SOL.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE de la matière séchée à l'air par l'absorption de :	
—	Vapeur d'eau (à + 30° C). — degrés centigr.	Gaz ammoniaque (à + 12° C). — degrés centigr.
Sable (fin pulvérisé)	1,08	0,80
Carbonate de chaux	1,47	0,80
Kaolin	2,63	2,50
Hydroxyde de fer	9,30	18,05
Humus (tourbe)	12,25	28,30

On voit que le calorique, devenant libre par la condensation de la vapeur d'eau et des gaz, peut être considérable, surtout pour l'humus ; son action sur le sol dans la nature est quand même très légère, parce que les processus ci-dessus ne sont pas continus et que très rarement on rencontre les conditions auxquelles sont liés ces processus de condensation.

Par suite de la mauvaise conductibilité de la croûte terrestre, le sol ne reçoit qu'une quantité insignifiante de la chaleur centrale. Aussi, cette faible source de chaleur est à peu près égale pour tous les sols.

Nous pouvons donc conclure que les différences dans l'échauffement du sol observées dans la nature sont provoquées par le soleil seul, puisqu'il n'existe pas d'autres sources de chaleur que celles

1. AT. SEELWAAG, *Forschungen, etc.*, vol. V, 1882, p. 210.

que nous avons mentionnées. Pour comprendre ces phénomènes assez compliqués, il faut d'abord parler de chacun des facteurs qui influent sur eux.

A) *Pouvoir absorbant et émissif du sol.* — Il n'a pas été fait de recherches sur le pouvoir absorbant du sol pour les rayons calorifiques proprement dits, c'est-à-dire pour les rayons ultrarouges invisibles du spectre solaire ; sur l'absorption des rayons lumineux la couleur du sol nous renseigne. On peut donc dire qu'à égalité d'action des rayons obscurs, les sols, à capacité calorifique égale, s'échaufferont d'autant plus que leur couleur sera plus foncée. *L'humus, par suite de sa couleur, aura un très grand pouvoir absorbant,* ce qui est vrai en effet. Sous l'action directe du soleil, la température d'un sol humique peut à la surface surpasser de 10° celle des sols minéraux de couleur claire, et atteindre parfois 50-60° centigrades.

Sur le pouvoir émissif la couleur du sol ne donne aucun renseignement ; la loi de KIRCHHOFF dit que le rapport entre le pouvoir absorbant et le pouvoir émissif est le même pour tous les corps, mais ceci n'est vrai que pour des rayons ayant une longueur d'onde égale à la même température. Les sols absorbent sous l'influence de l'insolation un mélange de rayons de toute réfrangibilité et de toute température, mais n'émettent jamais que des rayons d'une faible réfrangibilité et d'une faible température. Les rayons absorbés sont donc autres que les rayons émis, d'où il suit qu'il ne faut pas juger *de plano* le pouvoir émissif d'après le pouvoir absorbant (A. VON LIEBENBERG).

D'après les recherches[1] faites jusqu'ici, nous pouvons actuellement accepter que la couleur du sol n'a aucune influence sur l'émission des rayons calorifiques et que les différences du pouvoir rayonnant des divers éléments du sol sont relativement faibles. Soit 100 le rayonnement du noir de fumée, celui des éléments du sol sera, d'après J. AHR[1] :

POUR LE SABLE.	POUR LE KAOLIN.	POUR L'HUMUS.
96,5	91,5	89,8

1. J. AHR, *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 397.

Donc, d'après ceci, nous voyons que *l'humus à l'état sec est celui des éléments du sol qui a le plus faible pouvoir rayonnant; vient ensuite l'argile* (kaolin), *tandis que le sable possède ce pouvoir au plus haut degré.* Si l'on pense que dans ces recherches l'erreur moyenne probable est de ± 1,4, et que dans les sols mélangés les chiffres obtenus sont très approchés, on doit conclure que les différences de rayonnement des divers sols ne sont pas très importantes. Comme le pouvoir rayonnant de l'eau est supérieur à celui des éléments du sol, le taux d'eau influera naturellement sur ce pouvoir, l'augmentant si lui-même augmente, et dans les divers sols diminuant les différences existant à l'état sec d'autant plus que ce taux d'eau est plus grand.

B) *Perte de chaleur par l'évaporation à la surface du sol.* — La quantité de chaleur solaire reçue par le sol est en partie perdue pour le réchauffement des couches profondes, parce que la chaleur est liée à l'évaporation. Cette perte de chaleur augmente ou diminue suivant le degré de l'évaporation, et elle a pour résultat un abaissement notable de la température du sol. Ce résultat peut se mesurer en comparant les températures de la surface des sols humides et des sols secs. Mes chiffres[1] peuvent en donner une idée suffisante :

	TEMPÉRATURE MOYENNE		
	en degrés centigr.	des sols à leur surface. en degrés centigr. — Tourbe	
	—	saturée.	humide.
Du 15 au 23 juin 1875	16,69	16,83	17,43
		Saturée.	Séchée à l'air.
Du 2 juillet au 9 juillet 1875 . .	19,73	22,11	24,63

Donc *la surface du sol s'échauffe, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus que son taux d'eau est plus faible, et réciproquement.*

C) *Conductibilité du sol pour la chaleur.* — La chaleur reçue par les couches superficielles se transmet aux couches profondes par conductibilité. Les différences de température entre les couches su-

1. E. WOLLNY, *Landwirthschaftliche Jahrbücher,* vol. V, 1876, p. 441-468.

perficielles et les couches profondes tendent à s'atténuer ; mais il faut un certain temps, ce qui explique une série de phénomènes que l'on observe dans l'étude des sols au point de vue thermique.

La marche de la chaleur, de haut en bas aussi bien que de bas en haut, est la plus lente pour l'humus, la plus rapide pour le sable, l'argile tenant le milieu entre les deux. D'après F. Wagner[1], l'augmentation moyenne de température d'une colonne de sol, de 24 centimètres de haut, de 10 centimètres de diamètre, celle du sable étant égale à 100, était :

POUR L'HUMUS.	POUR L'ARGILE.	POUR LE SABLE.
80,6	84,5	100,0

Plus les particules du sol sont étroitement juxtaposées, plus sa conductibilité est grande. Les différences à cet égard sont en général d'autant plus grandes que le taux d'eau de la masse est plus élevé. L'eau augmente la conductibilité du sol dans une assez forte proportion, et d'autant plus que le taux d'humidité est plus grand et que les éléments sont meilleurs conducteurs, et *vice versa*. C'est pour cette dernière raison que l'influence de l'eau sur la conductibilité de l'humus est incomparablement plus faible que celle qu'elle exerce sur les sols minéraux, surtout le sable[2].

D) La *capacité calorifique* (*chaleur spécifique*) *du sol*, comme la faculté d'imbibition, se rapporte au volume[3] et s'exprime par la quantité de calories nécessaire pour élever d'un degré la température d'un volume donné de sol, en comparaison avec un volume égal d'eau dont la chaleur spécifique est = 1. La chaleur spécifique des sols à l'état sec est seulement 1/6 à 1/3 environ de celle de l'eau.

Des divers éléments du sol, l'humus a la plus petite chaleur spé-

1. J. Wagner, *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 1. V. aussi E. Pott, *Die landwirthschaftlichen Versuchsstationen*, vol. XX, 1877, p. 273 et 321.

2. Comparez E. Pott, *loc. cit.*, p. 339.

3. A. von Liebenberg, *Untersuchungen über die Bodenwärme. Habilitationsschrift.* Halle, 1875, p. 13-25.

cifique, le sable la plus grande, l'argile tenant le milieu entre les deux, comme le prouvent d'ailleurs les chiffres de R. ULRICH[1] :

Chaleur spécifique, rapportée au volume.

HUMUS.	ARGILE.	SABLE.
0,1647	0,2333	0,2919

La chaleur spécifique du sol augmente naturellement avec l'élévation de son taux d'eau. Elle est donc pour le même sol d'autant plus grande que son hygroscopicité et sa faculté d'imbibition sont plus élevées. Les chiffres de R. ULRICH le montrent clairement :

TAUX D'EAU DES ÉLÉMENTS.	CHALEUR SPÉCIFIQUE rapportée au volume.		
	Humus.	Argile.	Sable.
Tout à fait sec	0,1647	0,2333	0,2919
Séché à l'air	0,1967	0,2627	0,2962
10 p. 100 de la faculté d'imbibition maxima	0,2427	0,2945	0,3300
20 — —	0,3207	0,3558	0,3682
30 — —	0,3987	0,4170	0,4063
40 — —	0,4767	0,4783	0,4445
50 — —	0,5548	0,5395	0,4826
60 — —	0,6328	0,6008	0,5208
70 — —	0,7108	0,6620	0,5589
80 — —	0,7888	0,7233	0,5972
90 — —	0,8669	0,7812	0,6353
100 — —	0,9449	0,8458	0,6735

La chaleur spécifique, avec un taux d'humidité assez élevé et une égale saturation relative d'eau, est donc la plus grande pour l'humus; vient ensuite l'argile et enfin le sable. Il faut ajouter que la chaleur spécifique augmente dans le même sol avec sa compacité.

E) *Action générale des facteurs de la température du sol.* — La température du sol, observée dans des conditions déterminées, est la résultante des actions de chacun des facteurs énumérés. Les influences qui résident dans le sol même réagissent entre elles d'une manière si compliquée, qu'il est impossible de se faire une idée exacte des propriétés spéciales des différents sols par des moyennes obtenues dans des observations de longue durée, et que seules les

1. R. ULRICH, *Forschungen, etc.,* vol. XVII, 1894, p. 1.

divergences (pour des périodes déterminées) avec les variations extérieures de température peuvent fournir des notions précises à ce sujet. Cela résulte de ce fait que, à conditions extérieures égales, les divers sols, malgré leur manière d'être sensiblement différente vis-à-vis des variations de température, n'accusent, pour la moyenne annuelle, ou aucune ou seulement une très faible différence. Ceci s'explique encore mieux quand on voit que les différences, pour ces diverses périodes, sont telles qu'elles s'équilibrent en additionnant. Les états thermiques du sol ne se laissent donc nettement saisir que lorsqu'on considère la marche de sa température. Pour caractériser les rapports des différentes espèces de sols avec la température reportons-nous aux chiffres suivants[1] :

Moyenne des pentades du mois d'août 1882 (degrés centigrades).

SOL.	PROFONDEUR de la boule du thermomètre.	1-5.	6-10.	11-15.	16-20.	21-25.	26-31.
	centimètres.						
Température de l'air.	»	13,70	14,17	18,20	14,01	14,07	12,74
Tourbe	5	15,61	16,80	21,57	16,95	16,67	14,92
	10	15,50	16,32	20,75	17,12	16,89	15,28
	15	15,44	16,07	20,04	17,68	16,88	15,50
	20	15,72	16,11	19,63	18,25	17,20	15,93
	25	15,98	16,20	19,06	18,55	17,45	16,25
Lehm	5	15,28	16,50	21,46	16,34	16,08	14,29
	10	15,15	16,13	21,09	16,43	16,36	14,52
	15	15,06	15,94	20,60	16,57	16,38	14,61
	20	15,15	15,82	20,33	16,80	16,47	14,88
	25	15,09	15,60	19.74	16,93	16,41	14,92
Sable	5	15,43	16,46	21,30	15,93	16,06	14,06
	10	15,33	16,28	21,16	16,07	16,39	14,29
	15	15,32	16,22	21,01	16,17	16,61	14,58
	20	15,29	16,07	20,69	16,31	16,63	14,78
	25	15,44	15,94	20,33	16,41	16,58	14,83

1. F. WAGNER, *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 50.

Observations quotidiennes du 11 au 15 août 1882 (degrés centigrades).

GENRE de sol.	PROFONDEUR de la boule du thermomètre.	11.		12.		13.		14.		15.	
		Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.
	centimètres.										
Température de l'air.	»	11,3	24.4	11,3	25,3	11,6	27,2	15,9	24,2	14.7	24,9[1]
Tourbe	5	15,4	26.3	15,5	27,2	15,8	27,7	18,6	25,2	18.0	26.0
	10	17,3	22,4	18,0	23,1	18,7	24,0	20,0	21.8	19,4	22.8
	15	18,2	19,6	19,2	20,4	19,8	21,1	20,6	20,5	20.0	21,0
	20	18.2	18,4	19,2	19,2	19,9	19,8	20,6	20,2	20.4	20,4
	25	17,7	17.8	18,5	18,5	19.2	19,2	19,9	19,8	20.0	20,0
Lehm	5	15,4	27.1	15,2	28,0	15.4	28,3	18,0	24,0	17.4	25,8
	10	16,0	25,1	16,4	25,9	17.0	26,6	19,0	22,9	17.8	24.2
	15	17,0	22.8	17,6	23,6	18,4	24,2	19,6	21,6	18,6	22,6
	20	17.6	21,3	18,5	22,0	19.2	22,8	20,2	21,0	19.1	21,6
	25	17,8	19,6	18,8	20,2	19.6	21.0	20,4	20,2	19.4	20,4
Sable	5	14.8	27,1	14.6	28,0	14,7	28,0	18,0	24,3	17,2	26,3
	10	15,0	26.4	15,2	27.0	15,6	27,3	18,6	23,8	17.1	25,6
	15	15,7	25,2	16,2	25,8	16,8	26,2	19,1	23,2	17.4	24,5
	20	16,6	23,5	17,2	24,0	18,0	24,6	19,6	22,2	18.1	23,1
	25	17,1	22,0	17,9	22,5	18,7	23.1	20,0	21.3	18.0	22,1

1. Les chiffres de la température de l'air donnent le minimum et le maximum.

Si l'on jette un coup d'œil sur les chiffres du premier tableau, on voit que le sable, dans presque toutes les couches, subit, de la première à la troisième pentade, une élévation de température plus considérable que la tourbe ; le lehm (ou l'argile) tient le milieu entre ces deux éléments extrêmes. Quant à l'abaissement de la température de la troisième à la sixième pentade, nous voyons que l'humus se refroidit beaucoup plus lentement dans toutes les couches du sol que ne le ferait le sable. Le lehm tient encore ici le milieu. Cette marche de la température n'a pas seulement lieu

pour une période, mais encore pour un seul jour, comme on peut s'en convaincre par les chiffres du second tableau. L'abaissement de la température pendant la nuit exerce une influence très déprimante sur celle des différentes couches de sable, tandis que la température du sol de tourbe est relativement peu altérée (comparez les observations du matin). L'élévation de la température de l'air pendant le jour augmente beaucoup la chaleur du sable jusque dans les couches profondes, l'humus au contraire ne subit que très lentement l'action des rayons solaires (comparez les observations du soir). Ces lois, qui ont été trouvées pour les périodes chaudes et froides d'un même jour, s'appliquent aussi aux variations de température des saisons. Il est donc permis de conclure que *pendant l'élévation de la température* (insolation ou saison chaude) *l'humus est de tous les éléments du sol celui qui s'échauffe le moins ; vient ensuite l'argile, le sable se réchauffant le plus ; pendant l'abaissement de la température* (nuit ou saison froide), *les rapports caloriques des différents éléments du sol sont renversés,* c'est-à-dire *que l'humus se refroidit le moins vite, le sable le plus vite, l'argile tenant le milieu.*

Nous voyons par là que, *avec une marche normale de la température, l'humus est en moyenne plus froid que le sable en été, plus chaud en hiver, l'argile tenant le milieu entre les deux.* Cette règle souffre cependant quelques exceptions par des temps anormaux, pour des périodes plus ou moins longues. Ainsi, lorsque pendant l'été il se produit fréquemment des abaissements de température, et que celle-ci est en général fraîche et humide, la température moyenne de l'humus peut être supérieure à celle du sable. De même pendant les hivers doux, ensoleillés et secs, l'humus peut avoir une température inférieure à celle du sable.

Les précédentes données sur les rapports thermiques des divers éléments du sol montrent encore que *les oscillations de la température sont les moins amples chez l'humus, les plus amples chez le sable, et moyennes pour l'argile.* Ces différences, qui diminuent avec la profondeur, sont très considérables, comme on peut le voir d'ailleurs d'après les observations du matin et du soir du deuxième tableau.

Les chiffres suivants[1] donnent une idée encore plus nette à ce point de vue :

Oscillations mensuelles moyennes.

1880.	TOURBE.	A 10 CENTIM. DE PROFONDEUR (degrés centigrades).	
		Lehm.	Sable.
—	—	—	—
Avril	5,30	8,98	10,25
Mai	9,08	14,20	15,90
Juin	7,31	11,43	13,34
Juillet	6,91	11,93	13,98
Août	4,77	8,91	12,01
Septembre.	4,93	7,37	9,87

Ce qui concerne la pénétration de la gelée dans le sol et son dégel peut être prévu d'après ce qui vient d'être dit sur les rapports des sols avec la chaleur. Il est clair que plus l'effet de la température extérieure sur les éléments du sol sera entravé, plus le gel et le dégel de l'eau du sol se fera lentement, et réciproquement. Les recherches de A. Petit[2] nous renseignent sur les lois qui régissent ce phénomène. Cet auteur s'est servi de caisses cubiques de 8 litres de contenance et faites avec des planches d'une épaisseur de 3 centimètres. Il les a remplies avec des sols à l'état de saturation capillaire, qu'il a exposés d'abord au froid à l'air libre, puis qu'il a fait dégeler dans une chambre à température assez élevée. Les lectures faites à une profondeur de 10 centimètres donnent les résultats suivants :

Congélation du sol.

TEMPS.	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE DES SOLS.		
		Sable.	Argile.	Tourbe.
—	—	—	—	—
Premier jour.				
10 heures matin .	— 9,0	3,60	3,35	2,65
2 heures soir . .	— 7,1	0,05	0,55	1,80
6 — . .	— 8,3	0,00	0,00	0,20
Deuxième jour.				
6 heures matin .	— 11,7	— 9,10	— 0,90	— 0,70
10 — .	— 10,6	— 11,90	— 5,10	— 0,70
2 heures soir . .	— 6,0	— 9,25	— 7,30	— 0,70
4 — . .	— 6,1	— 8,65	— 7,30	— 0,70

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 205-210.
2. A. Petit, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 285.

TEMPS.	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE DES SOLS. Sable.	Argile.	Tourbe.
Troisième jour.				
8 heures matin .	— 10,8	— 12,50	— 11,90	— 2,20
8 heures soir . .	— 7,9	— 7,30	— 5,60	— 5,10
Quatrième jour.				
8 heures matin .	— 8,9	— 10,20	— 9,60	— 8,50

Dans la nature ces trois éléments du sol se comportent de même, comme le prouvent mes chiffres que voici :

DATES. — Décembre 1879.	TEMPÉRATURE de l'air.	TOURBE.			ARGILE.			SABLE.		
		Température moyenne du sol (degrés centigrades), à une profondeur de								
		10 centimètres.	40 centimètres.	70 centimètres.	10 centimètres.	40 centimètres.	70 centimètres.	10 centimètres.	40 centimètres.	70 centimètres.
1- 5 .	— 9,36	— 3,10	+ 1,96	+ 3,36	— 2,19	+ 0,59	+ 2,46	— 4,51	— 0,31	+ 1,44
6-10 .	— 12,48	— 4,91	+ 1,36	+ 3,27	— 3,97	— 0,33	+ 1,74	— 6,30	— 1,27	+ 0,71
11-15 .	— 11,15	— 6,40	+ 0,82	+ 2,71	— 5,19	— 1,33	+ 1,14	— 7,31	— 2,47	+ 0,05
16-20 .	— 15,19	— 11,09	— 0,17	+ 2,18	— 9,04	— 3,66	+ 0,49	— 11,93	— 5,62	— 1,43
21-25 .	— 12,78	— 11,00	— 0,42	+ 1,69	— 8,93	— 4,59	— 0,16	— 11,53	— 5,46	— 1,98
26-31 .	— 5,59	— 6,61	— 0,91	+ 1,55	— 5,00	— 4,37	— 0,85	— 5,11	— 3,91	— 1,91

Voici les résultats de A. Petit sur la marche de la température dans le sol congelé, sous l'influence d'une température élevée de l'air.

Dégel du sol.

TEMPS.	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE DU SOL. Sable.	Argile.	Tourbe.
Premier jour.				
9 heures matin. .	+ 23,1	— 10,15	— 9,65	— 8,50
10 — . .	+ 23,1	— 6,90	— 8,50	— 8,05
11 — . .	+ 24,2	— 2,60	— 5,75	— 6,30
12 heures (midi). .	+ 25,0	— 0,60	— 3,70	— 5,00
1 heure soir. . .	+ 24,6	— 0,15	— 2,40	— 4,15
2 — . . .	+ 23,2	0,00	— 1,70	— 3,65
3 — . . .	+ 21,6	0,00	— 1,25	— 3,30
4 — . . .	+ 20,0	0,00	— 0,95	— 3,05
5 — . . .	+ 19,4	0,00	— 0,75	— 2,85
6 — . . .	+ 19,3	+ 0,05	— 0,60	— 2,70
8 — . . .	+ 17,4	+ 0,20	— 0,50	— 2,40

TEMPS.	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE DU SOL. Sable.	Argile.	Tourbe.
—	—	—	—	—
Deuxième jour.				
5h,30m matin . .	+ 10,5	+ 3,80	— 0,20	— 1,80
6 ,30 — . .	+ 15,9	+ 4,60	— 0,20	— 1,70
7 ,30 — . .	+ 20,3	+ 5,80	— 0,10	— 1,60
8 ,30 — . .	+ 21,8	+ 7,10	— 0,10	— 1,60
9 ,30 — . .	+ 22,9	+ 8,40	0,00	— 1,50
10 ,30 — . .	+ 21,8	+ 9,70	0,00	— 1.40

Il ressort de ces chiffres que *la gelée pénètre le plus lentement dans l'humus, le plus rapidement dans le sable, l'argile tenant encore le milieu ; et qu'au point de vue du dégel au printemps ces éléments du sol conservent les mêmes relations.*

Les causes des phénomènes précédents résident surtout dans les différences que présentent les sols dans leur chaleur spécifique et leur conductibilité. Dans l'humus, la surface libre du sol, surtout à l'état sec, peut, en raison de la forte absorption de rayons solaires résultant de sa couleur foncée, s'échauffer par le soleil beaucoup plus que la couche correspondante d'un sol minéral ; mais la chaleur reçue ne profite pas aux couches profondes, à cause de la mauvaise conductibilité et de la grande chaleur spécifique de ce sol à l'état humide. Ce sont encore ces deux dernières propriétés qui sont causes, comme nous l'avons montré d'ailleurs, du refroidissement très lent de l'humus. Le sable conduit très rapidement dans la profondeur la chaleur qu'il reçoit, et quand la température s'abaisse, il se refroidit aussi très rapidement, parce qu'il est, nous l'avons vu, parmi tous les éléments du sol, celui dont la conductibilité est la meilleure, et que, d'autre part, en raison de son faible taux d'eau relatif, il possède la chaleur spécifique la moins forte. C'est pour cela que la perte de chaleur produite par l'évaporation est relativement légère pour cette espèce de sol. Comme les propriétés de l'argile tiennent le milieu entre celles des deux sols précédents, la température dans les sols argileux se meut aussi entre les deux autres courbes.

On doit enfin mentionner ici, à propos des sols humiques (tourbières), un fait très important pour la culture ; c'est que, dans ces sols, les *gelées nocturnes* du printemps et de l'automne non seulement sont plus fréquentes, mais encore apparaissent plus tôt et plus

tard que dans les sols minéraux. Les plantes sensibles aux basses températures voient donc leur existence menacée au plus haut degré dans ces sols tourbeux.

On a trouvé les causes de ce fait, d'une part, dans le froid produit par l'évaporation abondante, d'autre part, dans le plus grand rayonnement des sols tourbeux comparés aux sols minéraux. On a encore exprimé l'opinion que l'évaporation et le rayonnement s'unissent pour refroidir pendant les nuits claires d'été et d'hiver la surface des sols tourbeux et la couche d'air qui l'avoisine, à un degré tel que les plantes sensibles gèlent[1].

Mais ces explications sont en contradiction avec la réalité, et ne peuvent aucunement s'appliquer à ces phénomènes, comme nous allons essayer de le démontrer.

Le froid produit par l'évaporation ne peut être la cause réelle de ces gelées nocturnes, puisque des sols minéraux qui évaporent autant d'eau et même plus que ceux dont on parle, comme, par exemple, les sols de lehm et d'argile (p. 347), n'éprouvent pas du tout ou n'éprouvent que rarement à la surface un refroidissement nuisible aux plantes. On ne peut pas non plus faire valoir que le pouvoir rayonnant supérieur des sols humiques dû à leur couleur foncée abaisserait la température superficielle au-dessous du point de congélation, puisque, d'une part, la couleur d'un corps n'est pas décisive pour son rayonnement (p. 364), et que, d'autre part, l'humus ne possède pas un pouvoir rayonnant plus grand, mais au contraire plus petit que tous les autres éléments du sol.

Le rayonnement est, il est vrai, la cause la plus proche des gelées nocturnes qui peuvent se produire uniquement par un fort rayonnement comme on le constate dans des nuits claires, calmes et pures ; mais cette cause ne peut être prise en considération dans la question qui nous occupe, car les conditions extérieures qui influent ici doivent exister sur tous les sols, lorsque leur surface se refroidit outre mesure. Il s'agit donc de préciser pourquoi, en cas de gelée, un refroidissement nuisible se produit plutôt dans les couches inférieures de l'atmosphère sur les sols humiques que sur les autres.

---

1. M. Fleischer, *Landw. Jahrb.*, vol XX, 1891, p. 853.

Nous avons vu que l'humus possède un pouvoir rayonnant non pas plus grand, mais plus faible que les autres éléments du sol. Cette loi ne peut servir de suite à résoudre la question, puisqu'elle n'a de valeur que pour des égales différences de température des sols que l'on compare. Dès qu'elles changent, le chiffre du rayonnement change. Si l'on chauffe un corps à des températures de plus en plus hautes, non seulement l'intensité des rayons caloriques qu'il envoyait tout d'abord s'accroît, mais encore il s'ajoute de nouveaux rayons d'une autre largeur d'onde. C'est pourquoi, à pouvoir émissif égal, les corps fortement chauffés perdent plus de chaleur par le rayonnement que ceux qui sont moins chauffés et la quantité de chaleur rayonnée est proportionnelle à la température pour des différences de température allant jusque 60° centigrades. Un sol humique dont la surface est chauffée à 50° centigrades perdra, pour les causes que nous venons d'énumérer, malgré son faible pouvoir rayonnant, plus de chaleur par rayonnement qu'un sol argileux, par exemple, chauffé à 30° centigrades seulement. On se demande si, d'après cela, les différences ci-dessus indiquées ne seraient pas en cause dans l'abaissement de la température. Pour décider la question, il n'est pas superflu d'expliquer un peu plus clairement les circonstances dans lesquelles se produisent les gelées tardives sur les sols tourbeux. La simple observation nous apprend que *les gelées nocturnes destructives du printemps ou de l'automne ne se font sentir dans les sols tourbeux que quand les couches superficielles sont desséchées*[1].

En tenant compte de ce fait, on peut expliquer ainsi les causes du phénomène en question.

Le sol tourbeux sec, chauffé fortement pendant l'insolation, se refroidira pendant les nuits claires par rayonnement beaucoup plus vite que le sol argileux, humide, à température moins élevée, et atteindra bien vite la température de ce dernier. Mais à ce moment le sol tourbeux rayonnera moins de chaleur que l'argile, puisque, à température égale, comme nous l'avons vu, son pouvoir rayonnant est plus petit. Pourtant si, comme l'expérience et l'observation

1. E. WOLLNY, *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 286.

le montrent, la température de l'humus tombe beaucoup plus bas que celle de l'argile, il faut évidemment admettre, pour l'explication de ce fait, d'autres causes que celle du rayonnement. En fait, ces relations dépendent en première ligne de la provision de chaleur du sol, laquelle est en rapport avec sa chaleur spécifique, et de la plus ou moins grande aptitude du sol à transmettre la chaleur par conductibilité [1]. La couche superficielle de l'humus desséché ayant une faible chaleur spécifique et une mauvaise conductibilité, ne peut pas remplacer la perte de chaleur due au rayonnement ; il est donc obligé de se refroidir avec l'air extérieur, beaucoup plus que ne le ferait l'argile qui, elle, est capable, tant par sa plus grande chaleur spécifique que par sa meilleure conductibilité, de dégager plus de chaleur et de remédier ainsi au refroidissement des couches d'air inférieures.

Avec une surface humide, le sol humique se tire mieux d'affaire, parce qu'il possède alors, par suite de son taux d'eau plus élevé, une plus grande chaleur spécifique et une meilleure conductibilité.

3. — Autres propriétés des humus.

Parmi les autres propriétés de l'humus qui ne sont ni physiques ni chimiques, on doit compter l'odeur, le goût, les propriétés antiseptiques et surtout la combustibilité (notamment pour la tourbe dans les pays à tourbières).

A) *Odeur*. — La plupart des tourbes fortement décomposées, principalement les tourbes infra-aquatiques riches en eau, ont une odeur plus ou moins marquée, due probablement aux gaz qui y sont contenus, tels que le formène, l'éthylène, l'hydrogène sulfuré, etc., et qui peut être perçue même à d'assez grandes distances quand on déplace la tourbe en grandes masses.

Il faut encore citer l'odeur propre de la terre, odeur presque aromatique qui se perçoit surtout dans les sols très humiques (terre de jardin) après une petite pluie chaude. D'après les recherches de

1. J. Ahr, *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 436.

BERTHELOT et ANDRÉ[1], elle est due à une matière organique neutre de la série aromatique qui s'évapore avec la vapeur d'eau et qui possède une odeur camphrée pénétrante, presque piquante. Cette matière n'est ni un alcali, ni un acide, ni un aldéhyde. Elle est précipitée de la solution aqueuse concentrée par un carbonate alcalin en formant un anneau de résine. Chauffée avec de la potasse, elle donne une odeur pénétrante semblable à celle d'une résine d'aldéhyde. La quantité obtenue par les chimistes précédents était trop faible pour qu'il fût possible de mieux déterminer sa composition chimique.

F. L. PHIPSON[2] croit devoir attribuer l'odeur de la terre à des matières organiques voisines des huiles éthérées qui, pendant les saisons sèches et chaudes, sont absorbées par la terre poreuse et se dégagent à nouveau quand elle est humectée par des pluies chaudes, comme cela arrive quand on souffle sur l'argile et la marne. Il obtint de la craie poreuse la substance odorante qui ne fut absorbée que par l'eau de brome. Le même chimiste isola l'odeur du bois de cèdre et montra dans ses propriétés physiques et chimiques de grandes ressemblances avec la cédrine bromée dérivant de l'huile de cèdre.

Dernièrement W. RULLMANN[3] réussit à obtenir la substance odorante sous forme de petits cristaux aciculaires. Après avoir trouvé à propos d'autres recherches qu'un champignon schizomycète, le *Cladothrix odorifera*, dégage en culture pure une forte odeur de terre, il éleva ce champignon dans du bouillon stérilisé pour séparer la matière odorante, distilla quand l'odeur se fut développée, agita le produit de la distillation avec de l'éther, reprit après évaporation le résidu par de l'eau contenant de l'acide chlorhydrique et obtint les cristaux dont il vient d'être question après évaporation complète de la solution. D'autre part, l'auteur obtint avec le produit de la distillation acidulé par l'acide chlorhydrique et après addition de chlorure de platine, un sel de platine qui, évaporé, cristallisa sous

1. *C. R.*, t. CXII, p. 598-599.

2. *Chemical News*, vol. LXIII, 1891, p. 179.

3. W. RULLMANN, *Chemischbacteriologische Untersuchungen von Zwischenfullungen mit besonderer Berücksichtigung von Cladothrix odorifera*. Munchen, 1895.

forme d'octaèdres à angles émoussés. L'on a ainsi la certitude d'obtenir la matière odorante en quantités assez grandes pour pouvoir déterminer exactement sa composition chimique. Ce sera d'autant plus facile que le *Cladothrix odorifera,* cultivé dans l'urine stérilisée à la proportion de 1|5, dégage déjà l'odeur terreuse au bout de huit jours.

On ne peut encore dire s'il y a une seule ou plusieurs espèces de microorganismes qui produisent cette odeur ; mais il est certain que le *Bacillus subtilis* et le *B. mycoides,* si fréquents dans le sol, ne la dégagent pas d'après les observations de W. RULLMANN.

L'espèce précédente n'est pas morphologiquement distincte du *Cladothrix dichotoma,* mais elle en diffère par ses propriétés biochimiques, celle-ci ne dégageant jamais l'odeur terreuse.

B) *Saveur.* — Parmi les divers humus, la tourbe seule possède une saveur propre, plus ou moins acide. Elle est styptique comme celle de l'encre si la tourbe contient du sulfate de fer.

C) *Propriétés antiseptiques de la tourbe.* — Par suite de l'absence presque complète de microorganismes et de la présence de certains composés organiques solubles (acide humique, huiles résineuses, etc.), la putréfaction de toutes les parties charnues de l'homme et des animaux enfouis dans la tourbe est arrêtée. Elles se transforment seulement, en général, en gras de cadavre (adipocire). Les diverses observations qui ont prouvé la faculté de conservation de la tourbe ont conduit naturellement à se demander si la tourbe avait la propriété d'empêcher la pullulation des bactéries et de les tuer. Un grand intérêt s'attache à cette question, parce qu'on a fait des objections, au point de vue sanitaire, aux essais récents relatifs à l'emploi du terreau de tourbe comme agglomérant pour les excréments humains et à son utilisation sous cette forme comme engrais ; on prétendait qu'il pouvait y avoir là un danger par la propagation des bactéries pathogènes. Cette objection était d'autant plus fondée que les anciennes observations n'avaient pas permis d'y faire une réponse catégorique.

En raison de l'importance du sujet, la commission des engrais de

la *Deutsche Landwirthschafts-Gesellschaft*[1] a fait instituer par divers savants (FRÆNKEL à Marburg, GÆRTNER à Iéna, LŒFFLER à Greifswald, STUTZER à Bonn) une série de recherches qui ont d'abord conduit à ce résultat que *le terreau de tourbe possède un pouvoir désinfectant assez considérable*; car les bactéries pathogènes qu'on y a mélangées, entre autres les bacilles du choléra, y ont été tuées. Ce résultat concorde avec cette observation que la tourbe employée comme bandage prévient la suppuration des blessures et amène leur prompte guérison et avec la conclusion de quelques anciennes expériences de GAFFKY[2], NEUBER[3] et C. REINL[4], d'après lesquelles la tourbe empêche la multiplication des bactéries et arrête complètement leur développement. Cela tient sans doute principalement à ce que la tourbe contient des acides libres qui, on l'a vu, arrêtent le développement des bactéries. *Mélangée aux excréments humains, la tourbe perd plus ou moins ses propriétés désinfectantes, parce qu'alors ses acides se combinent au carbonate d'ammoniaque qui se dégage surtout de l'urée et que la masse, devenant alcaline, présente une composition chimique favorable à la pullulation des bactéries.* En réalité, comme l'ont montré les résultats des expériences de la *Deutsche Landwirthschafts-Gesellschaft*, l'adjonction de terreau de tourbe ne tue pas d'une manière certaine les germes des maladies contagieuses contenus dans les matières fécales. *Ce résultat ne peut être atteint qu'en ajoutant à la tourbe assez d'acide pour que la masse ait une réaction acide et tue les bactéries qui transforment l'urée en carbonate d'ammoniaque.*

D) La *combustibilité de la tourbe* varie énormément suivant sa composition; elle dépend surtout de son taux de carbone, d'eau et de principes minéraux. *La puissance calorifique de la tourbe, toutes choses égales d'ailleurs, croît avec son taux de carbone*. Il en résulte

1. L'action microbicide du terreau de tourbe. Quatre expériences faites sous les auspices de la commission des engrais, avec explications par J. H. VOGEL. *Arbeiten der deutschen Landwirthschafts-Gesellschaft*, 1er fascicule, Berlin, 1894.

2. GAFFKY, *Archiv für klinische Chirurgie*, 28e volume, 3e fascicule.

3. NEUBER, *idem*, 27e volume, 4e fascicule, et 28e volume, 3e fascicule.

4. C. REINL, *Prager medicinische Wochenschrift*, 1886, nos 13-15.

qu'elle est d'autant plus élevée que la tourbe est plus vieille (p. 312). *A mesure que les taux d'eau et de cendres augmentent dans la tourbe, la chaleur qu'elle développe en brûlant diminue,* ainsi que l'attestent les chiffres suivants[1] :

1 kilogr. de tourbe à 60 p. 100 de carbone, 6 p. 100 d'hydrogène et 34 p. 100 d'oxygène développe :

	CALORIES.	TEMPÉRATURE.
	—	—
		degrés.
Avec 0 p. 100 de cendres, à l'état sec . .	5 451	2 100
— 5 — — . .	5 179	2 092
— 10 — — . .	4 906	2 081
— 20 — — . .	4 360	2 042
— 10 p. 100 d'eau	4 906	2 052
— 25 —	4 089	1 933
— 15 p. 100 d'eau et 10 p. 100 de cendres.	4 089	1 967
— 30 — 20 — .	2 725	1 761

Plus la tourbe renferme d'eau, plus se réduit la partie pratiquement utilisable de la chaleur dégagée, puisqu'une portion de la chaleur produite doit être employée à volatiliser l'eau de la tourbe.

Il s'ensuit que, dans une même tourbière, la valeur calorifique de la tourbe augmente en général avec la profondeur et que *celle de la tourbe supra-aquatique est plus grande que celle de la tourbe infra-aquatique,* parce que celle-ci renferme plus de cendres (p. 316). La première est donc très supérieure comme combustible.

Remarquons aussi que ses couches superficielles n'ont qu'une faible valeur calorifique à cause de leur incomplète décomposition, tandis qu'elles ont un grand pouvoir d'absorption pour l'eau et les gaz ; il est donc logique d'utiliser les couches superficielles de ces tourbières à sphaignes comme litière et les couches profondes seulement comme combustible.

1. C. et K. Birnbaum, *Die Torf-Industrie und die Moorkultur,* Braunschweig, 1880, p. 195.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DES HUMUS SUR LA FERTILITÉ DU SOL

Les influences si compliquées de l'humus sur la fertilité des sols présentent, suivant que l'humus entre comme partie intégrante ou comme couverture, des différences telles qu'il est bon de les étudier séparément.

1. — L'humus comme élément du sol.

Son influence sur la végétation varie suivant la quantité que le sol en renferme. C'est un fait d'expérience qu'un taux modéré d'humus exerce l'action la plus favorable sur la fertilité, tandis qu'un excès dans le sol est en général tellement nuisible que seules les plantes sans valeur peuvent y prospérer. Les limites entre lesquelles l'humus agit avantageusement sont difficiles à préciser parce qu'elles diffèrent suivant les propriétés des autres éléments du sol. Que dans une terre peu fertile viennent à s'accumuler quelques centièmes d'humus, cela pourra déjà avoir une grande importance, étant donnée la mauvaise composition de cette terre. Une faible dose d'humus suffisante pour faire désigner un sol sablonneux comme riche en humus fera qualifier de pauvre un sol fertile de lehm ou d'argile qui possède toutes les conditions requises pour une abondante production d'humus. Dans de tels sols un taux de 5 à 6 p. 100 peut être considéré comme le minimum exigible pour qu'ils soient dits riches en humus. Chez les sols agricoles les plus fertiles la teneur en humus dépasse rarement 15 p. 100 et la plupart des champs n'en contiennent pas plus de 2 à 5 p. 100.

L'influence qu'exerce une dose semblable sur la fertilité du sol est avantageuse sous plusieurs rapports. Elle a trait aux propriétés chimiques et physiques du sol.

A) *L'humus agit chimiquement* en contribuant directement et indirectement à enrichir le sol en matières nutritives assimilables et en les soustrayant à l'action dissolvante des eaux d'infiltration.

Les combinaisons humiques du sol sont-elles absorbées par les plantes ou sont-elles inutiles à la formation des matières organiques, c'est là une question qui a été souvent agitée mais qui n'a pas encore reçu une solution définitive. On a plusieurs fois soutenu que des combinaisons organiques ne pouvaient être absorbées par les végétaux supérieurs puisqu'elles ne sont pas diffusibles[1]. Cette objection n'est pourtant pas inattaquable ; car, d'après les recherches de A. PETERMANN[2], il y a dans le sol des matières organiques qui diffusent à travers une membrane de parchemin, comme le montrent les chiffres ci-dessous :

100 grammes de terre fine ont laissé diffuser au bout de 10 jours les quantités suivantes de matière organique (grammes).

SOL sablonneux.	SCHISTE ARGILEUX et sable.	SCHISTE ARGILEUX et calcaire.	ARGILE sableuse.	SABLE ARGILEUX. I.	SABLE ARGILEUX. II.
—	—	—	—	—	—
0,0328	0,0125	0,0660	0,1811	0,0255	0,0384

La nature des éléments organiques dialysables du sol n'est pas encore connue; mais elle diffère en tout cas de la *matière noire* de GRANDEAU (p. 306) puisque celle-ci ne traverse ni le parchemin ni la membrane des cellules végétales ; elle diffère aussi de l'acide humique et de l'humate d'ammoniaque qui ne se diffusent pas.

Bien qu'en ce qui concerne la dialyse du sol les essais avec le parchemin ne puissent être appliqués *de plano* aux cellules végétales, il est permis de conclure de ces essais à la possibilité de l'absorption par les plantes de certaines matières humiques et d'y trouver une

1. W. DETMER, *Landwirthschaftliche Versuchsstationen,* vol. XIV, p. 291.
2. A. PETERMANN, *Bulletin de l'Académie royale de Belgique,* t. III, 1882, n° 1.

confirmation des travaux depuis longtemps oubliés de E. Risler[1]. Celui-ci admettait, contrairement à la doctrine de Liebig, que les plantes prennent une partie de leur carbone aux matières organiques du sol.

P. P. Dehérain[2] a fait à ce sujet des essais avec deux betteraves dont l'une provenait d'un sol riche en matière organique et l'autre d'un sol pauvre sous ce rapport, mais bien pourvu de principes minéraux et de nitrates.

Voici les différences présentées à la récolte :

		TERRE RICHE en matière organique.	TERRE PAUVRE en matière organique, mais riche en matières minérales.
Poids de toute la plante	gr.	730	165
Poids des racines	gr.	410	92
Sucre dans 100 p. de jus.		15.04	11.11
Sucre dans toute la plante	gr.	61,60	10,12

La betterave venue dans le sol pauvre en matière organique avait donc, malgré une forte provision d'eau et de principes nutritifs, fourni une récolte bien moindre que celle qui provenait d'un sol riche en matière organique. Dehérain conclut de là que la différence constatée dans les récoltes ne pouvait tenir qu'à la différence dans le taux de matière organique des deux sols et que la betterave doit sans doute trouver pour son développement normal, outre les principes minéraux et les nitrates, des matières organiques solubles dialysables. Ceci s'accorde avec les recherches de A. Petermann. Il peut se faire, ajoute-t-il, que quelques autres plantes se comportent de même tandis que d'autres peuvent se passer de ces matières.

Les analyses précédentes n'autorisent cependant pas une pareille conclusion parce qu'on n'a pas montré qu'il y a absorption directe de la matière organique ni que la quantité des substances dialysables

1. E. Risler, *Archives de la Bibliothèque de Genève,* 1858.
2. P. P. Dehérain, *Annales agronomiques,* t. XV, 1889, p. 481-505.

diffère dans les deux sols. Ajoutons que, eu égard à la grande différence dans le développement des plantes analysées, il semble hasardé de tirer une conclusion à si grande portée de recherches faites sur deux spécimens seulement.

Divers essais de fumure dus notamment à J. B. LAWES et J. H. GILBERT ont montré que les plantes agricoles végétant dans un sol riche en matières organiques, c'est-à-dire fumé au fumier de ferme, donnent des récoltes sensiblement plus abondantes que celles des terrains pauvres en humus mais pourvus de sels nutritifs par l'épandage d'engrais minéraux.

E. BRÉAL[1] a fait dernièrement des expériences dans le but de prouver l'absorption directe des matières humiques par les végétaux supérieurs.

Les jeunes plantes développées : 1° dans l'eau ordinaire additionnée de nitrates et de phosphate de chaux ; 2° dans l'eau ordinaire avec humate de chaux ; 3° simplement dans l'eau ordinaire, ont produit dans leurs organes tant aériens que souterrains les poids suivants de substance sèche (en grammes) :

	1.	2.	3.
100 plants de lentilles . . .	2,250	4,000	2,750
10 — de blé	0,475	1,050	0,450
3 — de fèves.	6,250	10,250	»

L'humate de chaux a donc favorisé sensiblement la croissance des jeunes plants. En outre, E. BRÉAL fit des essais sur le *Poa annua* ; il en arracha une touffe, enleva les racines et mit les plantes dans un vase sur le fond duquel était une mince couche d'eau pour provoquer la formation de nouvelles racines. Quand elles furent développées, il partagea la touffe en deux parties égales et les mit toutes deux dans une solution d'humate de potasse mais en séparant dans l'une des moitiés les racines des tiges. Au bout de deux ou trois jours, l'humate de chaux avait complètement disparu dans la solution où les racines attenaient aux tiges, tandis que dans le

1. E. BRÉAL, *Annales agronomiques*, t. XX, 1894, p. 353-370.

vase où les racines gisaient séparées la solution était restée inaltérée. En analysant les solutions à l'aide du bichromate de potasse et de l'acide sulfurique, on vit que dans le premier vase les racines avaient absorbé une quantité de carbone correspondant à 0gr,20 d'acide carbonique (= 0gr,055 C.). L'humate de soude agit de même.

Le même savant disposa sur le fond d'un vase contenant un peu d'eau de source une bande de papier à filtre trempée dans l'acide humique et y enfonça les racines d'un *Poa*. Là où les racines touchèrent le papier, elles imprimèrent leur trace dans la couche d'acide humique comme l'avaient fait sur la plaque de marbre les racines de fèves dans la célèbre expérience de J. Sachs. Enfin E. Bréal a montré que les plantes (*Poa annua*) pouvaient absorber le sucre par leurs racines (voir *Note D*).

Ces résultats prouvent que des matières organiques peuvent être utilisées par les végétaux supérieurs à chlorophylle ; pourtant, on ne peut encore en conclure que ces matières sont absorbées telles quelles par les plantes ; car, d'après les recherches de H. Molisch[1] sur les excrétions des racines et leur action sur des matières organiques, il se pourrait que les matières en question subissent avant leur absorption une modification chimique plus ou moins profonde. H. Molisch montre que la racine par son excrétion acide ne corrode pas seulement les plaques de pierre polie, mais agit encore sur les corps organiques et même d'une manière plus intense que sur les minéraux puisqu'au lieu d'une simple dissolution elle provoque ici une transformation chimique.

Cette excrétion de la racine peut être considérée comme un auto-oxydant qui amène la combustion des substances facilement oxydables, donc aussi des matières humiques.

L'érémacausis des matières organiques du sol doit être favorisée par les sécrétions des racines ; ne sait-on pas que les engrais végétaux se transforment plus vite dans un sol pourvu de racines que dans un sol qui n'en contient pas ? L'action favorable de l'humus sur la crois-

1. H. Molisch, *C. R. de l'Académie des sciences de Vienne. Math.-naturw. Klasse*, XCVI, 3, p. 84-109.

sance des plantes peut donc être attribuée aussi bien à une absorption directe qu'à l'assimilation de matières nutritives provenant de transformations chimiques de cet humus.

B. FRANK[1] a fait dernièrement une découverte importante relative au mode particulier d'absorption des matières organiques, probablement albuminoïdes, par certains arbres. Il a trouvé que *certains arbres, notamment les cupulifères et les conifères, ne se nourrissent pas directement du sol mais vivent en symbiose*[2] *dans tout leur système radiculaire avec un mycélium qui joue le rôle de nourrice et transporte à l'arbre la nourriture qu'il a puisée dans le sol.*

« Si sur l'un quelconque de nos hêtres, chênes, charmes, coudriers, châtaigniers, pins[3], etc., on examine les petites racines absorbantes, elles se montrent généralement formées de deux éléments hétérogènes ; une partie centrale représentant la racine elle-même et une écorce soudée aux tissus sous-jacents et formée de filaments mycéliens. Ce manteau de mycélium enveloppe complètement la racine, même son point végétatif ; il s'accroît avec elle par l'extrémité et se comporte à tous égards comme un tissu périphérique appartenant à la racine et lui étant organiquement lié. L'ensemble n'est donc ni uniquement une racine d'arbre ni un champignon ; mais c'est, comme le thalle des lichens, une association de deux êtres différents en une entité morphologique que l'on peut appeler une racine à champignon ou *mycorhize*. » Le champignon apparaît après la germination tout d'abord sur les racines latérales de premier et de second ordre. C'est chez le charme que son invasion est la plus rapide ; des plants d'un an ont déjà toutes leurs racines absorbantes transformées en mycorhizes. C'est chez le chêne que l'apparition du champignon se fait le plus attendre ; souvent des plants d'un et deux ans ou bien encore certaines portions des

1. B. FRANK, *Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft*, 1885, p. 128-145, et vol. VI, p. 248-249. — *Biologisches Centralblatt*, 1885, vol. V, p. 225-228.

2. On entend par *symbiose* le fait très répandu dans la nature de deux êtres d'espèces différentes s'associant pour vivre en commun.

3. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 26e année, 1894, p. 185-190.

racines de plants plus vieux ne sont que partiellement champignonnés.

Les racines absorbantes dépourvues de mycélium possèdent alors, comme celles des autres végétaux, des poils absorbants qui manquent toujours aux mycorhizes. Celles-ci s'accroissent très lentement en longueur, mais grossissent plus et ont une plus grande tendance à la ramification qui souvent prend l'aspect coralliforme; la ramification est endogène et monopodique. Comme les racines absorbantes, les mycorhizes ont une durée de vie limitée, et les plus grosses, celles qui deviennent des ramifications lignifiées et durables du système, perdent leur manteau mycélien qui est propre aux parties jeunes, à celles qui jouent un rôle dans la nutrition.

B. Frank a constaté la présence régulière du champignon à tous les âges, sur toutes les racines, dans tous les sols et tous les pays, chez *Carpinus betulus, Corylus avellana, Fagus silvatica, Quercus pedunculata, Q. sessiliflora, Q. rubra, Castanea vesca, Salix, Populus, Pinus, Abies* et *Picea*. Par contre, les mycorhizes n'ont jamais été rencontrées sur *Betula, Alnus, Ulmus, Morus, Platanus, Juglans, Pirus, Cratægus, Prunus, Robinia, Tilia, Acer, Rhamnus, Cornus, Fraxinus, Syringa, Sambucus*. Le mycélium radiculaire fait donc un choix rigoureux entre les espèces; dans une forêt de hêtres, les racines de hêtre seront seules envahies et pas celles de *Hedera, Acer, Anemone, Oxalis,* etc.

Voici les motifs qui portent à croire que les mycorhizes des arbres jouent le rôle de nourrices :

1° La mycorhize existe partout, ce qui n'est pas le fait du parasitisme ordinaire, toujours accidentel. Le fait que cette symbiose est universellement répandue, affectant partout et toujours chaque individu, lui donne le caractère d'une adaptation de la plante à l'activité du champignon, activité dont elle tire un certain profit.

2° La présence des mycorhizes dépend du taux d'humus. Elles se rencontrent toujours dans le sol forestier ordinaire riche en humus et manquent partout où manque l'humus d'arbre. Elles sont produites par l'humus naturel forestier et le mycélium qui y croît.

Inversement, si l'on transporte des plantes avec mycorhizes dans un sol absolument privé d'humus, les racines perdent peu à peu leur mycélium. Ce n'est donc pas dans les racines vivantes que celui-ci trouve ses conditions d'existence, mais bien plutôt dans l'humus des arbres.

3° La symbiose de la racine et du champignon présente une série de particularités qui concordent pleinement avec l'idée que le champignon est un fournisseur d'aliment pour l'arbre et qui forcent à admettre cette manière de voir. Ainsi c'est toute la région de la racine capable d'absorber qui est revêtue d'un manteau mycélien continu intimement lié à la racine à laquelle la nourriture arrive par son entremise. Ce manteau, dans les circonstances naturelles ordinaires, ne manque dans aucune saison. Pendant un temps assez long, plusieurs saisons de végétation, la mycorhize est pour la plante un organe en fonctionnement, adapté à l'assimilation de l'humus. La façon dont plante et champignon sont associés correspond exactement aux exigences auxquelles doit satisfaire la mycorhize considérée comme organe puisant dans l'humus par son champignon des aliments pour la plante. L'action des champignons des mycorhizes sur le sol forestier est très importante, car l'humus forestier est constitué pour une bonne partie par une innombrable quantité de mycéliums vivants qui le traversent en tous sens. Les mycorhizes ne renferment pas trace d'acide nitrique (même si le sol et les végétaux qui y croissent en contiennent), ni les racines, tandis qu'on le décèle dans les racines absorbantes des arbres non mycorhizés. La combinaison azotée assimilée par le champignon de la mycorhize est inconnue ; il paraît absorber l'azote sous une forme autre que l'acide nitrique. L'importance de cette symbiose consisterait donc en ce que le champignon serait à même de puiser à des sources d'azote inutilisables sans lui par les végétaux supérieurs. « Chez les plantes à chlorophylle les champignons des mycorhizes agissent surtout en absorbant l'azote de l'humus. »

4° Les résultats de diverses expériences et observations militent encore en faveur de l'alimentation des arbres par l'humus, grâce aux champignons des racines. De jeunes chênes et hêtres peuvent

bien vivre dans des solutions nutritives et dans un sol dépourvu de champignons ; mais leur nutrition est meilleure quand elle se fait avec l'humus par l'intermédiaire des mycorhizes. Des plants de hêtre venus de semis moururent en partie déjà à la fin du premier été à la suite d'une alimentation sans humus ni champignon ; les autres vécurent chétivement encore une année puis périrent l'un après l'autre. Le hêtre sans mycorhize se nourrit mal comme le montrent les cultures faites parallèlement en sol stérilisé et non stérilisé. Dans le premier les plants meurent peu à peu.

On a observé aussi que le pin sylvestré en sol normal de bonne qualité ne se développe pas s'il n'y a pas de champignon de racine et si, par suite, la formation des mycorhizes se trouve entravée, tandis que dans le même sol et les mêmes conditions extérieures il se développe puissamment s'il possède des mycorhizes.

« Tous ces faits viennent à l'appui de la thèse suivante. L'humus du sol forestier est vivifié par des champignons[1] qui ont la propriété de faire passer dans l'organisme végétal le carbone et l'azote des détritus des arbres et de les employer directement à son alimentation. Les arbres forestiers qui ne jouissent pas par eux-mêmes de cette faculté utilisent ces mycéliums de l'humus (grâce à la symbiose que leurs racines contractent avec eux) pour reprendre aussitôt et aussi complètement que possible les éléments précieux de leurs propres déchets. » (B. Frank.) L'arbre serait donc, à proprement parler, un parasite de ces champignons saprophytes ; mais il est plus probable qu'il y a bénéfice réciproque (non encore déterminé) et que le champignon retire de la racine de l'arbre la récompense de son service.

En raisonnant d'après tous ces faits, on arrive à ce résultat que les végétaux supérieurs à chlorophylle ont la faculté d'absorber et d'utiliser certains éléments de l'humus. Il ne faut cependant pas conclure à leur indispensabilité puisque de nombreux essais ont prouvé que les plantes vertes peuvent atteindre leur maximum de rendement même en l'absence de matières organiques et prendre

1. On ne peut encore déterminer sûrement la place de ces champignons dans la classification. Ils appartiennent probablement aux Tubéracées et aux Hyménogastrées.

dans l'atmosphère tout le carbone dont elles ont besoin. Même en laissant de côté ses fonctions comme aliment, l'humus garde toute sa valeur au point de vue de la fertilité des sols parce qu'il exerce, en outre, l'action la plus favorable sur leurs propriétés physiques et chimiques, comme nous allons essayer de le démontrer plus loin.

Nous avons dit, au début de ce livre (p. 5), que la décomposition des matières organiques, quand elle se fait dans les conditions de l'érémacausis, donne naissance, en dehors de l'eau et de l'acide carbonique, à de l'ammoniaque, qui se transforme en nitrate par oxydation ultérieure, et à des principes minéraux solubles originairement contenus sous forme inassimilable soit dans le sol, soit dans les détritus végétaux ou animaux[1]. Donc, à mesure que les matières humiques se décomposent, le sol s'enrichit en ammoniaque (et nitrates) et en principes minéraux qui peuvent être utilisés par les plantes. C'est une circonstance favorable, dans l'emploi des engrais d'origine organique comparés aux engrais artificiels à sels très solubles, que les principes nutritifs ne se forment pas tout d'un coup dans les transformations de l'humus, mais peu à peu, ce qui fait que les matières, surtout les azotées, sont protégées très efficacement contre la dissolution.

Des recherches de E. Simon[2] il résulte que l'acide humique entre en combinaison avec certains minéraux du sol, entre autres l'acide phosphorique. On produit ces combinaisons entre l'acide phosphorique et la matière organique en mélangeant une dissolution d'humate d'ammoniaque avec une dissolution étendue d'acide phosphorique. Déjà L. Grandeau[3] était arrivé à penser qu'il existe des combinaisons entre les matières organiques et minérales du sol, et ces composés, dans les idées de ce savant, sont une des principales causes de la fertilité des sols.

---

1. Remarquons qu'une partie des éléments minéraux des détritus végétaux est dissoute par les excrétions des racines et absorbée par cette voie, si bien qu'après l'érémacausis des matières qui existaient d'abord sous forme insoluble, comme des minéraux non décomposés, passent sous une forme facilement soluble.

2. Biedermann's *Centralblatt für Agrikulturchemie,* vol. VIII, 1875, p. 74.

3. *Journal d'agriculture pratique,* 1872, n°s 14-17, 20 et 43.

L'action indirecte de l'humus consiste surtout en ce que les corps qui se forment dans l'érémacausis ont la faculté de rendre solubles certains principes minéraux insolubles. Ainsi, selon F. Senft [1], les silicates alcalins et alcalino-terreux, les phosphates de chaux et de fer sont décomposés et rendus solubles par un contact assez prolongé avec l'humate d'ammoniaque. Merschtschersky [2] a montré en outre que l'orthose est attaqué par l'humus et Eichhorn [3] a établi par de nombreuses recherches que des terres humifères renfermant des acides humiques libres mettent en liberté les acides des solutions de sels neutres et déterminent une acidité plus accusée que celle qu'on constate sans l'intervention de ces sels. Cette mise en liberté intéresse surtout les phosphates ; aussi acide phosphorique et phosphates entrent en solution.

L'humus favorise donc l'utilisation des substances minérales du sol en les mettant dans un état assimilable et en accélérant ainsi évidemment la végétation.

L'humus exerce une action indirecte très importante par la grande quantité d'acide carbonique qui se produit dans l'érémacaucis et agit sur divers minéraux du sol en les dissolvant. Cette action s'exerce tant sur les carbonates alcalino-terreux (chaux et magnésie) qui se transforment alors en bicarbonates que sur les minéraux des silicates alcalino-terreux ou alcalins ou de protoxyde de fer. Ces derniers sont décomposés lentement, mais graduellement, sous l'influence de l'humidité d'un sol riche en acide carbonique ; la silice hydratée est mise en liberté et il se forme des carbonates qui se dissolvent dans l'eau et servent à la nutrition des plantes. Les recherches de Th. Dietrich [4] montrent dans quelles limites s'exerce cette action ; il traita des sols et des roches soit avec de l'eau distillée, soit avec de l'eau contenant de l'acide carbonique et dosa les minéraux dissous.

---

1. F. Senft, *Lehrbuch der Gesteins- und Bodenkunde,* 2e édition, Berlin, 1877, p. 331.

2. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft,* vol. XVI, p. 2283.

3. *Landwirthschaftliche Jahrbücher,* vol. I, 1877, p. 957.

4. Th. Dietrich, *Journal für praktische Chemie,* vol. LXXIV, p. 129.

Voici les résultats qu'il obtint :

Poids total en grammes des minéraux dissous dans 200 grammes.

	LEHM humifère.	LEHM calciné.	PORPHYRE.	BASALTE.	PHOSPHORITE.	GNEISS.	GRAUWACKE.	GRÈS rouge.
Eau distillée. .	0,039	0,085	0,020	0,016	0,032	0,067	0,133	0,013
Eau avec acide carbonique. .	0,072	0,171	0,040	0,298	0,072	0,340	0,166	0,467

Dans les expériences de A. Stöckhardt [1] sur 10 000 parties en poids de roche pulvérisée il s'est dissous dans

	PORPHYRE.	BASALTE.	LEHM calciné.
Eau distillée	10	8	42
Eau avec acide carbonique. . .	20	149	85

C'était de la potasse, de la soude et de la chaux.

K. Haushofer [2] a pu constater que d'un granit pulvérisé provenant d'Unter-Röslau dans les Fichtelgebirge il s'est dissous sur 1 000 parties dans

Eau pure.	0,062
Eau avec acide carbonique. . . .	0,172

Les recherches faites par A. Cossa [3] sur du gneiss, de la phonolithe, du trachyte, du basalte, etc., ont conduit à un résultat absolument semblable.

Th. Dietrich a montré que l'acide phosphorique est dissous par l'acide carbonique de combinaisons difficilement solubles telles que la phosphorite. Une phosphorite d'Annaberg a perdu en acide phosphorique dans

Eau distillée	traces.
Eau avec acide carbonique. . . .	0,0019

D'après tous ces résultats, *l'humus exerce sur le sol une action*

1. A. Stöckhardt, *Chemischer Ackersmann,* 1873, p. 230.
2. K. Haushofer, *Journal für praktische Chemie,* vol. 103, p. 121.
3. A. Cossa, *idem.,* vol. 106, p. 381.

utile en ce que, grâce à l'acide carbonique formé, il favorise la décomposition et la dissolution de certains minéraux insolubles et contribue ainsi à augmenter la réserve nutritive du sol.

La décomposition par l'acide carbonique des silicates précédents a pour conséquence la production non seulement de matières nutritives solubles, mais encore d'une certaine quantité d'argile et de silice qui forment avec les alcalis et les terres alcalines des sels doubles particuliers (zéolithes) et ces sels jouent un rôle important dans le sol lors de l'absorption chimique des matières nutritives.

Comme l'acide carbonique l'ammoniaque produite dans l'érémacausis provoque la dissolution de minéraux encore intacts, surtout si l'eau contient en même temps de l'acide carbonique. Ceci a été prouvé par Th. Dietrich qui a obtenu les chiffres suivants :

Quantité totale en grammes de matières minérales dissoutes dans 200 grammes.

	LEHM humifère.	LEHM calciné.	PORPHYRE.	BASALTE.	MICA.	PHOSPHORITE.
Eau distillée	0,039	0,085	0,020	0,016	0,020	0,032
Eau distillée avec carbonate d'ammoniaque	0,073	0,066	0,038	0,534	0,013	0,035
Eau avec acide carbonique et carbonate d'ammoniaque	0,128	0,118	0,058	0,667	0,045	0,050

De la phosphorite il s'est dissous dans

	ACIDE phosphorique.
Eau distillée	0,0019
Eau distillée avec carbonate d'ammoniaque	0,0052
Eau avec acide carbonique et carbonate d'ammoniaque	0,0032

Enfin, parmi les influences chimiques de l'humus, celle qu'il exerce en vertu de son pouvoir absorbant pour les matières nutritives est de la plus haute importance. L'énergie avec laquelle elles sont retenues par l'humus et soustraites à l'action dissolvante des eaux d'infiltration est très considérable, comme nous l'avons montré plus haut (p. 327). Cette influence se fait surtout sentir dans les sols pauvres en argile, donc dans les sols légers, sablonneux qui, sans l'humus

fournissent de grandes quantités d'eau d'infiltration (p. 218 et 350). Les sables riches en humus sont déjà, par ce seul fait, beaucoup plus fertiles que ceux dont le taux de matière organique est faible ou nul.

B) *Fonctions physiques de l'humus.* — Presque dans tous les cas l'humus exerce sur les propriétés physiques des sols minéraux une action extrêmement favorable, quoique différente. Relativement à la cohésion du sol, les expériences de H. Puchner[1] montrent nettement que l'humus diminue la cohésion dans tous les sols argileux. Avec un taux d'eau de 0, 20, 40 et 60 p. 100 de la faculté d'imbibition totale, la cohésion absolue d'un cylindre de terre de 3 centimètres de hauteur et 2 centimètres de diamètre a atteint en moyenne avec

Kaolin.	2/3 vol. Kaolin. 1/3 vol. Humus.	1/3 vol. Kaolin. 2/3 vol. Humus.
24 251 gr.	21 708 gr.	4 644 gr..

La ténacité du sol argileux diminue donc à mesure qu'il renferme plus d'humus. Avec le sable quartzeux, dont la cohésion est faible, on remarque une influence analogue de l'humus, mais dans ces sols elle est évidemment de peu d'importance.

L'humus diminue aussi la résistance que les sols, les sols compacts surtout, opposent au travail mécanique des instruments aratoires. La résistance aux instruments tranchants s'abaisse d'autant plus que la proportion d'humus dans le sol est plus grande. Avec un taux d'eau s'élevant de 0 p. 100 à 20 p. 100 de la faculté d'imbibition totale (de 20 p. 100 en 20 p. 100) la résistance à la rupture a été en moyenne pour

Kaolin.	2/3 vol. Kaolin. 1/3 vol. Humus.	1/3 vol. Kaolin. 2/3 vol. Humus.
9 833 gr.	5 713 gr.	2 281 gr.

L'adhérence de la terre aux instruments aratoires diminue aussi à mesure que le taux d'humus augmente. Par exemple, dans les expériences de J. Schachbasian[2] sur l'adhérence entre une plaque

1. H. Puchner, *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 195.
2. J. Schachbasian, *Forschungen, etc.*, vol. XIII, 1890, p. 193.

d'acier poli de 100 centimètres carrés et un sol modérément pressé contre elle, il a fallu pour la rompre un poids en grammes avec

Kaolin.	2/3 vol. Kaolin. 1/3 vol. Humus.	1/3 vol. Kaolin. 2/3 vol. Humus.	Quartz.	2/3 vol. Quartz. 1/3 vol. Humus.	1/3 vol. Quartz. 2/3 vol. Humus.
Pour un taux d'eau = 100 p. 100 de la faculté d'imbibition totale.					
3 347,4	2 068,4	1 913,8	1 956,8	1 840,6	1 632,2
Pour un taux d'eau = 80 p. 100 de la faculté d'imbibition totale.					
5 212,8	2 251,8	116,6	0	0	0

L'influence du taux d'humus sur le coefficient de frottement se manifeste, d'après les recherches du même auteur, de la manière suivante :

Coefficient de frottement en volume.

Humide.	Kaolin.	2/3 Kaolin. 1/3 Humus.	1/3 Kaolin. 2/3 Humus.	Sable.	2/3 Sable. 1/3 Humus.	1/3 Sable. 2/3 Humus.
Acier poli . . .	0,4335	0,4195	0,4850	0,8250	0,7930	0,7305

Nous voyons, d'après ces chiffres, que pour le kaolin (argile) le frottement augmenta d'une manière insignifiante avec le taux d'humus, tandis que le coefficient de frottement du sable, au contraire, baissa considérablement et proportionnellement au taux d'humus.

En comparant tous ces résultats, on arrive à conclure que *l'humus rend plus légers, plus faciles à cultiver, les sols minéraux, surtout les sols compacts.*

Une certaine proportion de matières organiques permet, en outre, l'établissement d'une structure normale du sol, comme celle qui consiste dans la mise en grumeaux, c'est-à-dire dans la formation de particules meubles et c'est pour l'obtenir qu'il faut une culture rationnelle du sol.

D'après les recherches de Th. Schlœsing[1] les humates ont la pro-

1. *Comptes rendus,* t. LXXIV, 1872, p. 1408.

priété de réunir en grumeaux les particules d'argile, de sable et de calcaire en jouant le rôle de ciment. Déjà 1 p. 100 d'acide humique, mélangé à de la chaux ou à de l'argile, était suffisant pour donner aux sols en question le degré de perméabilité en rapport avec la mise en grumeaux, et pour augmenter ainsi remarquablement leur perméabilité à l'air et à l'eau. De ces faits l'on peut conclure que *l'humus, outre ses autres bonnes qualités, possède encore celle d'ameublir les sols compacts.*

Parmi les autres effets qu'un taux variable d'humus exerce sur l'état physique des sols minéraux, ceux qui ont trait à la manière dont les sols se comportent vis-à-vis de l'eau, méritent une attention spéciale. Mes recherches[1] au moyen de lysimètres de 400 centimètres carrés de surface et de 0m,30 de haut ont donné, du 1er avril au 30 septembre, les résultats suivants :

Année.	Lehm.	3/4 Lehm. 1/4 Humus.	1/2 Lehm. 1/2 Humus.	1/4 Lehm. 3/4 Humus.	Sable.	3/4 Sable. 1/4 Humus.	1/2 Sable. 1/2 Humus.	1/4 Sable. 3/4 Humus.
Taux d'eau moyen des sols en volume p. 100.								
1882	34.35	38.96	39.48	43.12	11,68	22.71	29.78	38.93
1884	34.23	36.53	37.28	38.99	12.34	19.72	25.27	34.09
Eau d'infiltration (en grammes) par 400 centimètres carrés de surface.								
1882	5 395	8 637	9 013	10 117	16 638	17 217	14 228	12 207
1884	5 991	7 295	7 098	7 596	13 256	14 065	13 155	11 044
Quantité d'eau évaporée (grammes) par 400 centimètres carrés de surface.								
1882	15 718	14 224	13 808	13 324	7 893	6 854	9 503	11 687
1884	14 373	12 949	13 256	12 409	7 198	6 039	6 706	9 060
Les mélanges ont été faits d'après le volume ; l'humus a été employé sous forme de poudre de tourbe.								

Ces chiffres montrent avec évidence :

1° Que l'élévation du taux d'humus dans des mélanges de lehm et de sable a pour résultat une augmentation de l'humidité de la masse, augmentation beaucoup plus grande dans le sable que dans le lehm.

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVIII, 1895, p. 27.

Ceci se constate lorsqu'on calcule les rapports (pour 1884) des chiffres précédents au lehm ou au sable pur :

Lehm.	3/4 Lehm. 1/4 Humus.	1/2 Lehm. 1/2 Sable.	1/4 Lehm. 3/4 Sable.	Sable.	3/4 Sable. 1/4 Humus.	1/2 Sable. 1/2 Humus.	1/4 Sable. 3/4 Humus.
1	1,07	1,09	1,14	1	1,60	2,05	2,76

La cause de cette progression caractéristique que nous observons dans ces chiffres tient essentiellement à ce que les facultés d'imbibition du lehm et de l'humus se ressemblent beaucoup plus que celles du sable et de l'humus. Ces deux éléments du sol doués d'une grande faculté d'imbibition s'influenceront dans leur mélange beaucoup moins que le feraient le sable et l'humus, dont le premier absorbe très peu et le dernier beaucoup d'eau. Pourquoi l'humus n'a-t-il exercé qu'une si faible influence sur la faculté d'imbibition des mélanges de lehm, c'est ce qui n'est pas encore suffisamment élucidé, car les différences dans la faculté d'imbibition des éléments considérés sont encore assez grandes. La raison pour laquelle, dans le mélange d'humus et de lehm, le taux d'eau varie moins tient à ce que la terre a formé alors des grumeaux bien nets qui ont diminué la faculté d'imbibition et augmenté la perméabilité du sol pour l'eau.

On peut encore conclure des chiffres précédents que :

2° *Dans les mélanges avec lehm les quantités d'eau qui s'infiltrent sont d'autant plus grandes que le taux d'humus est plus élévé,* tandis que *dans les mélanges avec sable c'est le contraire qui a lieu.*

Si la perméabilité des mélanges avec lehm augmente avec le taux d'humus, cela tient d'une part à la plus grande perméabilité de l'humus comparé à l'argile, et de l'autre à la formation de grumeaux produite par l'humus. Quant au sable, le fait s'explique parce que la faculté d'imbibition augmente avec le taux d'humus, et que la perméabilité du mélange diminue dans la même mesure. Si dans le mélange de 3/4 de volume de sable et 1/4 de volume d'humus il y a eu plus grande perméabilité que dans le sable pur, c'est parce que justement dans ce mélange la mise en grumeaux a été plus accentuée.

Enfin, nous concluons que :

3° *Dans les mélanges avec lehm les quantités d'eau évaporée sont*

d'autant plus petites qu'ils sont plus riches en humus, et qu'au contraire *dans les mélanges avec sable l'évaporation augmente avec le taux d'humus.*

Pour l'explication de ces faits, rappelons que la circulation de l'eau dans le lehm se ralentit à mesure que le taux d'humus augmente, et que l'eau évaporée est plus difficilement remplacée. D'abord, l'humus conduit l'eau moins rapidement que le lehm et, en outre, le sol se dispose en grumeaux qui entravent l'ascension de l'eau vers la surface. L'évaporation est donc inversement proportionnelle à l'infiltration, de sorte qu'en moyenne leurs effets s'équilibrent presque, et dans le taux d'eau des substances c'est surtout leur faculté d'imbibition qui s'exprime.

L'effet de l'humus sur le plus ou moins d'humidité des sols de culture se manifeste surtout, d'après ce que nous venons de voir, par ceci que les sols légers, dans lesquels les plantes souffrent facilement du manque d'eau, deviennent plus humides et par conséquent plus fertiles, tandis que ceux qui sont compacts et qui retiennent bien l'eau deviennent plus perméables.

La température du sol se modifie suivant son taux d'humus comme on le voit par mes chiffres[1] ci-dessous :

Lehm.

JUILLET 1883.	TEMPÉRATURE DU SOL A 15 CENTIMÈTRES de profondeur.				OSCILLATION DE LA TEMPÉRATURE.			
	Lehm.	3/4 Lehm. 1/4 Humus.	1/2 Lehm. 1/2 Humus.	1/4 Lehm. 3/4 Humus.	Lehm.	3/4 Lehm. 1/4 Humus.	1/2 Lehm. 1/2 Humus.	1/4 Lehm. 3/4 Humus.
1- 5	21,58	21,65	21,80	21,92	8,5	8,3	8,0	5,2
6-10	22,36	22,42	22,44	22,53	6,9	7,3	6,1	4,3
11-15	21,24	20,95	20,97	21,17	8,1	7,7	7,4	6,8
16-20	14,94	15,25	15,34	15,57	4,6	4,0	3,9	3,5
21-25	15,82	15,94	15,93	15,98	6,9	6,1	5,6	5,2
26-31	15,37	15,35	15,40	15,57	6,6	5,0	4,5	3,9
Moyenne	18,49	18,49	18,54	18,68	6,93	6,40	5,92	4,82

1. L'humus a été employé sous forme de tourbe pulvérisée. Les températures ont été prises quotidiennement à 7 heures du matin et à 4 heures du soir.

Sable.

	Température du sol à 15 centimètres de profondeur.				Oscillation de la température.			
	Sable.	3/4 Sable. 1/4 Humus.	1/2 Sable. 1/2 Humus.	1/4 Sable. 3/4 Humus.	Sable.	3/4 Sable. 1/4 Humus.	1/2 Sable. 1/2 Humus.	1/4 Sable. 3/4 Humus.
Juillet 1883 :								
1- 5	23,79	23,60	23,44	22,86	11,0	9,8	9,0	6,3
6-10	23,75	23,62	23,51	23,10	9,2	8,2	7,2	4,8
11-15	21,62	21,74	21,74	21,83	11,9	10,5	9,3	7,2
16-20	15,22	15,41	15,46	15,65	5,7	5,3	4,9	4,1
21-25	16,46	16,40	16,27	16,13	11,3	11,2	8,5	6,2
26-31	16,12	16,08	15,88	15,82	9,8	9,1	7,2	4,6
Moyenne	19,38	19,36	19,27	19,12	9,82	8,85	7,68	5,3

	Température du sol à 15 centimètres de profondeur.							
	Lehm.	3/4 Lehm. 1/4 Humus.	1/2 Lehm. 1/2 Humus.	1/4 Lehm. 3/4 Humus.	Sable.	3/4 Sable. 1/4 Humus.	1/2 Sable. 1/2 Humus.	1/4 Sable. 3/4 Humus.
Nov. 1883 :								
1- 5	7,06	7,23	7,30	7,34	6,97	6,96	7,20	7,26
6-10	7,52	7,60	7,71	7,76	7,39	7,38	7,62	7,68
11-15	3,58	3,82	4,01	4,22	3,19	3,34	3,93	4,39
16-20	1,29	1,65	1,70	1,87	1,58	1,65	1,81	1,98
12-25	2,42	2,68	2,81	2,69	2,37	2,42	2,65	2,59
26-30	2,57	2,99	2,94	3,01	2,98	2,98	2,96	2,94
Moyenne	4,07	4,33	4,41	4,48	4,08	4,12	4,37	4,47

Si l'on considère d'abord les observations faites pendant la saison chaude, on voit que l'influence de l'humus sur la température du sol est très faible dans les pentades et dans les moyennes mensuelles. Avec l'augmentation du taux d'humus on remarque une tendance à l'élévation de la température dans le lehm, et à son abaissement dans le sable; mais les différences sont très légères. Que pourtant il doive y avoir des différences notables dans la marche de la chaleur du sol, c'est ce qui ressort clairement des chiffres relatifs aux oscillations de la température; on les voit diminuer à mesure que le taux d'humus augmente dans le sol. Il doit donc se trouver dans le réchauffement

du sol certaines singularités qui ne ressortent pas dans les moyennes. En effet, c'est ce que l'on voit lorsque l'on jette un coup d'œil sur le tableau suivant où on a noté séparément les observations du soir et celles du matin.

Température du sol à 15 centimètres de profondeur.

JUILLET 1883.	Lehm.		3/4 Lehm. 1/4 Humus.		1/2 Lehm. 1/2 Humus.		1/4 Lehm. 3/4 Humus.	
	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.
1- 5	18,12	25,04	18,52	24,17	19,16	24,44	20,12	23,72
6-10	19,48	25,24	19,72	25,08	20,22	24,62	20,96	24,10
11-15	19,02	23,46	19,00	22,90	19,32	22,62	19,84	22,50
16-20	13,98	16,10	14,42	16,08	14,60	16,08	14,98	16,16
21-25	14,32	17,32	14,78	17,10	14,88	16,98	15,14	16,82
26-31	13,59	17,15	14,03	16,67	14,18	16,62	14,56	16,58
Moyenne . . .	**16,38**	**20,60**	**16,67**	**20,31**	**16,97**	**20,11**	**17,49**	**19,87**
Différence. . .	4,22		3,64		3,14		2,38	

Température prise à 15 centimètres de profondeur.

JUILLET 1883.	Sable.		3/4 Sable 1/4 Humus.		1/2 Sable. 1/2 Humus.		1/4 Sable. 3/4 Humus.	
	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.	Matin.	Soir.
1- 5	18,72	28,86	19,46	27,74	19,82	27,06	20,56	25,26
6-10	19,84	27,66	20,48	26,76	20,82	26,20	21,38	24,82
11-15	18,66	24,58	19,08	24,40	19,36	24,12	20,18	23,48
16-20	13,60	16,84	14,02	16,80	14,30	16,62	14,92	16,38
21-25	14,12	18,80	14,34	18,46	14,60	17,94	15,08	17,18
26-31	13,62	18,62	13,69	18,47	13,96	17,80	14,59	17,05
Moyenne . . .	**16,38**	**22,40**	**16,73**	**21,99**	**17,04**	**21,50**	**17,66**	**20,58**
Différence. . .	6,02		5,26		4,46		2,92	

Ces chiffres prouvent que le maximum de la température (soir) est d'autant plus élevé que le sol contient moins d'humus, et réci-

proquement le minimum (matin) est d'autant plus élevé que le taux d'humus du sol est plus grand[1]. Comme l'échauffement du sol varie avec les changements de temps et de saisons, suivant que la température monte ou descend, on peut dire, d'une manière générale, que, *par une température croissante et élevée, le sol se réchauffe d'autant plus faiblement,* et, réciproquement, *par une température décroissante et basse le sol se refroidit d'autant plus lentement que les quantités d'humus dans le sol sont plus grandes.* Suivant les circonstances extérieures, la variation de la température du sol avec divers taux d'humus sera très inconstante ; néanmoins, en général, l'échauffement du sol sera d'autant plus ralenti par les temps chauds, d'autant plus prolongé par les temps froids[2] que l'humus existera dans le sol en plus grande quantité.

D'après tout cela, l'action de l'humus sur la chaleur du sol peut se résumer ainsi : *il diminue, dans certaines limites, les oscillations de la température du sol provenant des variations des facteurs extérieurs.*

Il reste encore à élucider si la couleur foncée, produite par l'addition de certaines quantités d'humus, a une influence favorable sur l'échauffement du sol[3]. Elle est réelle, tant que le taux de substances organiques ne dépasse pas une certaine limite, c'est-à-dire tant que, par l'addition d'humus, on n'augmente pas sensiblement la chaleur spécifique du sol ni qu'on ne diminue pas sa conductibilité. Mais si le taux d'humus est assez élevé pour influer sur ces deux propriétés, alors le sol minéral clair peut, comme nous l'avons vu plus haut, être plus favorisé par les températures croissantes et élevées, et l'influence de la coloration peut être sans action.

C) La *fermentation du sol* (Bodengahre) peut être légitimement étudiée ici puisque c'est un état du sol agricole qui est principa-

1. C'est pour cela que la différence entre le maximum et le minimum de la température du sol diminue à mesure qu'augmente le taux d'humus.

2. Comparez les observations de la température de novembre 1883.

3. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. I, 1878, p. 43.

lement dû au concours de ses éléments organiques, et qui se ramène à une modification des propriétés physiques et chimiques favorable au développement des plantes. Si différent que paraisse cet état de celui qu'on nomme « Ackergahre », ce n'est en réalité qu'un seul et même phénomène, c'est-à-dire un certain degré de porosité et d'humidité des sols après une fumure fraîche ou après qu'on a déchaumé ou retourné les prairies naturelles ou artificielles.

Le sol apparaît friable et grumeleux; il est facilement perméable à l'air, se distingue par son taux d'eau normal et modéré, enfin il est pourvu plus ou moins abondamment des substances nutritives nécessaires à l'accroissement des plantes utiles.

Comme cause de cette modification des sols agricoles, on invoque souvent un ameublissement spontané qui serait dû à une décomposition accélérée des éléments humiques ou des engrais d'origine organique et à l'action des grandes quantités d'acide carbonique qui en résultent. Une pareille distension du sol ne serait possible que si ce dernier, semblable à la pâte de pain, formait une masse s'opposant à la sortie de l'acide carbonique. Mais ce n'est pas le cas; le sol, grâce à la porosité provoquée par cette fermentation, est dans un état qui justement facilite considérablement la sortie de l'acide carbonique; il est donc impossible d'admettre l'idée d'un ameublissement spontané du sol. L'expérience montre au contraire et diverses recherches[1] ont établi par des chiffres que le sol arable meuble, qui n'est pas labouré pendant un certain temps, voit son volume diminuer constamment par la pression des couches supérieures sur celles situées au-dessous, et surtout par l'effet mécanique de la pluie; il devient plus compact, de sorte qu'il est souvent nécessaire de le labourer fréquemment, s'il n'est pas couvert, pour lui conserver son ameublissement.

Si nous réfléchissons au fait déjà mentionné (p. 247), que, par suite de la température relativement plus élevée et du taux d'eau supérieur des sols nus ou couverts d'une couche de fumier, la décomposition des matières organiques s'y produit plus vite et plus intensément

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 31.

que dans le sol couvert de plantes vivantes, nous pourrons conclure de suite que ce que l'on nomme *Ackergahre*[1] désigne *un état physique du sol de culture, provoqué surtout par le maintien de la jachère ou d'une couverture morte et par un ameublissement consécutif en temps utile et au moyen de la charrue et de l'extirpateur, état qui favorise la décomposition des éléments humiques ou du fumier.*

Tous les auteurs agronomiques sont d'avis que la jachère est la condition la plus importante pour arriver à cet état particulier du sol qui ne s'obtient point par force en peu de temps et par de simples travaux aratoires, mais qui exige une période plus ou moins longue.

Le sol arable est donc obligé de se reposer pendant un certain temps avant d'être apte à cet état particulier. Pour connaître comment agissent dans ce cas les forces de la nature, prenons l'exemple suivant.

Qu'on se figure un chaume de trèfle en sol compact. Celui-ci, par suite de la forte évaporation du trèfle et de la sécheresse, est tellement durci qu'il est impossible d'y pénétrer avec le soc de la charrue. Ce sol doit être mis en état d'ameublissement (*Gahre*) à partir de la fin de juin jusqu'à l'automne. Dans ces conditions il paraît logique d'après le procédé recommandé par SCHWERZ et plus tard par DE ROSENBERG-LIPINSKI de racler superficiellement le sol, afin d'en détruire la couverture végétale. Il se forme ainsi à la surface une couche riche en vides dits « non capillaires » et en débris végétaux, qui laissera passer facilement l'eau des pluies tout en diminuant considérablement l'évaporation pendant la sécheresse.

Le sol qui est au-dessous de cette mince couche labourée deviendra avec le temps plus humide, surtout si l'on a eu soin de la herser pour l'ameublir. Tandis qu'au début il était impossible d'enfoncer un bâton dans ce sol durci par la sécheresse, on le peut maintenant, non pas, comme l'admet DE ROSENBERG-LIPINSKI, parce que le sol s'est ameubli de lui-même sous sa couverture, mais parce qu'il est

1. Ce terme n'a pas d'équivalent en français. (Trad.)

devenu plus humide et n'offre plus à cet état de résistance sérieuse[1].

Quand l'humidité a pénétré assez profondément, on laboure le sol qui possède alors son taux normal d'humidité, celui qui lui donne la plus faible adhérence ; le mieux est de labourer en sillons aussi étroits que possible et à pleine profondeur ; on l'amène ainsi à un état grumeleux, poreux que l'on cherche à conserver, surtout si de fortes averses l'ont altéré, en employant les extirpateurs qui paraissent très propres à cet usage.

Le sol a ainsi reçu indirectement par la jachère et par la couche superficielle retournée formant obstacle à l'évaporation l'eau qui lui manquait, et par un labour en temps utile il a acquis la structure grumeleuse des sols ameublis. Il reste dans la suite constamment humide, plus ou moins, parce que le maintien en jachère et l'état grumeleux du sol le préservent d'une trop forte dessiccation. Les substances organiques, aussi bien celles qui se trouvent primitivement dans le sol que celles, telles que le fumier, qui y sont incorporées par la charrue, peuvent facilement se décomposer et fournir jusqu'au moment des semailles d'hiver d'assez grandes quantités de matières nutritives solubles ; car le sol se trouve alors dans l'état physique le plus favorable : il est perméable et, en outre, humide, puisqu'il ne possède pas de couverture. De cette manière, le sol a vu non seulement s'améliorer considérablement sa composition mécanique et son taux d'eau, mais encore il est devenu plus riche en matières nutritives assimilables.

Les explications qui précèdent montrent les conditions nécessaires pour mettre le sol dans l'état le plus favorable au développement des processus organiques. Ces conditions sont applicables non seulement aux cas précités, mais encore à tous ceux où il s'agit d'une culture rationnelle de la couche végétale. Ce traitement sera d'un très grand intérêt non seulement pour les sols compacts, c'est-à-dire argileux ou autres semblables, qui ont déjà par eux-mêmes une tendance à se mettre en grumeaux, mais encore il est recommandable pour les sols légers qui ne se mettent pas en grumeaux, en ce qu'il

---

1. H. Puchner, *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 208.

augmente le taux d'eau du sol et son aptitude à l'échauffement et provoque même sur ces sols, d'après les praticiens, une sorte de fermentation (*Gahre*).

Tant que, parmi les praticiens, régneront, au sujet des influences de la couverture végétale et de la jachère sur les agents de la décomposition des matières organiques, les idées les plus embrouillées en contradiction avec les faits réels et que les résultats des nombreuses recherches faites sur ces questions resteront méconnus, il sera impossible d'avoir une vue nette des phénomènes. Aucun sujet d'économie rurale n'a fourni matière jusqu'ici à autant d'inepties. Cela s'explique parce qu'on part de l'idée complètement erronée, ne reposant sur rien, que la couverture végétale maintient le sol humide, tandis que la jachère le dessèche (p. 238).

Dès lors il n'était pas possible d'expliquer d'une manière simple comment la jachère favorisait la décomposition des matières organiques et l'ameublissement du sol, et il fallait recourir à l'hypothèse que l'ameublissement du sol aurait pour cause une condensation de la chaleur, de l'air et de l'humidité, même dans les cas où le sol n'a pas été cultivé et se trouve à l'état naturel. Si l'on considère que les gaz atmosphériques et l'humidité ne sont condensés en quantités un peu importantes que par un sol déjà meuble et que la vapeur d'eau de l'atmosphère ne mouille nullement le sol arable, puisqu'elle s'évapore à nouveau quand la température augmente[1], on ne comprend pas comment, dans un sol compact, ameubli seulement à la surface, il puisse se produire une condensation d'air et d'humidité, ou comment un sol ameubli, mais sec, puisse s'humecter au degré nécessaire pour la mise en train des processus organiques.

De même, les opinions sur ce qu'on appelle « la fermentation à l'ombre » (*Beschattungsgahre*) ne correspondent pas à la réalité des faits.

En partant de l'idée fausse que la couverture végétale maintient l'humidité du sol, on a cru pouvoir conclure que la décomposition des substances organiques est particulièrement active dans le sol labouré et provoque ainsi l'ameublissement spontané du sol.

---

1. S. Sikorski, *Forschungen, etc.*, vol. IX, 1886, p. 413.

Mais nous avons vu plus haut (p. 247) qu'en réalité c'est le contraire qui se passe et que, grâce à la dessiccation du sol par les plantes et à la basse température, l'intensité des processus organiques diminuait notablement. Si c'était possible, l'état meuble du sol sous une couverture végétale épaisse ne pourrait être provoqué par une « fermentation » (*Gährung*). On ne pourra constater une augmentation du degré d'ameublissement du sol sous les plantes, mais seulement son maintien plus ou moins constant. L'ameublissement produit avant les semailles par le travail mécanique du sol diminue aussi bien dans le sol ombragé par les plantes que dans celui qui est en jachère, pas à beaucoup près cependant autant dans le premier que dans le dernier ; il diminue d'autant moins que les plantes sont mieux développées et plus drues[1].

Cela tient à ce que la couverture végétale atténue considérablement l'effet des pluies qui démolissent la structure grumeleuse du sol. La pluie tombant d'abord sur les plantes stille ensuite goutte à goutte sur le sol : lorsqu'elle le frappe directement avec violence, elle désagrège les particules de terre qui, alors, forment une croûte superficielle.

Il ne peut donc être question d'une fermentation provoquée par les plantes et d'un ameublissement qui y serait lié, mais seulement du maintien de l'état mécanique originairement favorable du sol, grâce à l'obstacle mis par les végétaux à la démolition des particules par les pluies.

D) L'*effet nuisible de quantités excessives d'humus* sur la fertilité du sol doit être surtout attribué aux trop grandes accumulations d'eau qui se produisent dans ces conditions et à leurs conséquences (diminution de l'accès de l'air). Il se fait remarquer principalement quand le sol n'est pas cultivé (prairies), ou qu'il se trouve dans les conditions favorisant l'accumulation d'eau en excès (marais). Dans ce cas, les matières organiques sont soumises à la putréfaction, mode de décomposition qui diminue singulièrement, comme nous l'avons vu plus haut (p. 13), la formation des éléments nutritifs assimilables qu'elles

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 31.

peuvent contenir et qui favorise au contraire la production de composés nuisibles à la végétation, tels que les acides humiques, le sulfate de fer, etc.

E) L'*importance de l'humus pour la culture du sol* peut s'apprécier suffisamment d'après ce que nous venons de dire. Tant qu'il se trouve mélangé aux sols minéraux dans certaines limites, son rôle est d'une telle importance pour la vie des plantes que *l'on peut considérer, dans la majorité des cas, la conservation et l'augmentation du taux d'humus comme le devoir le plus important de la culture du sol.*

Cette conclusion paraît pleinement justifiée si l'on se rappelle les nombreux effets favorables de l'humus sur la fertilité du sol. Ainsi que nous l'avons vu, c'est lui qui augmente directement et indirectement la richesse du sol en matières nutritives assimilables, et qui, par sa lente décomposition et son pouvoir absorbant considérable, obvie efficacement à la perte des éléments nutritifs par la lixiviation.

On a montré en outre que l'humus, mélangé aux terres, les rend plus meubles et plus faciles à travailler ; les sols compacts deviennent perméables, plus faciles à s'humecter ; les eaux d'infiltration diminuent donc et les conditions thermiques sont modifiées heureusement par l'atténuation des extrêmes de température. (Voir *Note F.* Sur l'humus et la fertilité du sol.)

Il suffit de se représenter toutes ces influences pour comprendre qu'en réalité il est absolument nécessaire, pour obtenir des récoltes maxima, que le sol possède un taux d'humus assez élevé. En même temps on saisit l'importance de *tous les engrais d'origine organique* (fumiers, compost, engrais verts, etc.). Puisque c'est par eux seulement que l'on peut satisfaire à la nécessité de maintenir et d'augmenter le taux d'humus dans le sol arable, *on doit les considérer comme les engrais principaux indispensables.* Dans les sols très humiques on n'aura pas besoin de ces engrais, et l'on pourra conserver à ce sol son plus haut degré de fécondité en employant exclusivement des engrais artificiels; *dans tous les autres cas, de beaucoup les plus nombreux, on n'atteindra le maximun de récoltes qu'en em-*

ployant d'une façon continue des engrais riches en matière organique. (Voir *Note G.* Sur la dénitrification par le fumier.)

L'inobservation de cette règle fondamentale et l'emploi exagéré d'engrais artificiels qui, d'après ce que nous venons de dire, ne peuvent être considérés que comme des engrais accessoires auxquels on a recours dans certaines insuffisances de composition des engrais principaux, pour satisfaire aux exigences des plantes à cultiver, ont amené, dans beaucoup d'endroits, une diminution considérable dans la production de sols autrefois fertiles, bien qu'ils continssent encore une riche provision de substances nutritives. Cela ne tient pas seulement à l'appauvrissement du sol en matière organique et à la détérioration de ses propriétés physiques et chimiques qui en est la conséquence, mais encore à ce que les sels facilement solubles contenus dans les engrais artificiels influent défavorablement sur la structure de la couche arable.

Les recherches de A. Mayer[1] et de E. W. Hilgard[2] montrent que les carbonates et les phosphates alcalins provoquent la compacité des sols et empêchent leur mise en grumeaux, tandis que les chlorures (sels de Stassfurt) et les nitrates (salpêtre du Chili) la favorisent tant qu'ils se trouvent dans la solution du sol ; mais, dès qu'ils sont dissous par l'eau d'infiltration (ce qui est d'autant plus facile que le sol n'exerce pas sur eux son pouvoir absorbant), il en résulte la formation désavantageuse d'un limon compact[3], tellement compact qu'il est complètement inaccessible à l'air et à l'eau, ce qui amène une diminution considérable de la fertilité. Ces changements défavorables se montrent clairement par exemple dans l'état physique des sols argileux qui ne reçoivent jamais que des nitrates. « Un sol forcé de cette manière donne, on le sait, au début, de belles récoltes, puis subitement apparaît une diminution qui, d'après les praticiens expérimentés, ne peut plus être simplement combattue par un engrais complet comme pour les sols sablonneux. Ce sol est pour longtemps ruiné dans son état physique, et c'est pour cela que les

1. A. Mayer, *Forschungen, etc.*, vol. II, 1879, p. 251.
2. J. W. Hilgard, *idem*, vol. II, 1879, p. 441.
3. A. Mayer, *Journal für Landwirtschaft*, année XXVII, 1879, p. 389.

Anglais, très experts en agronomie, ont complètement abandonné les fumures de nitrates. » (A. MAYER.) Les chlorures agissent de la même façon.

L'emploi exclusif ou principal d'engrais artificiels est doublement nuisible à la fertilité surtout des sols argileux et à grains fins, d'abord parce que, par cette pratique, les terres s'appauvrissent en humus, qui se détruit peu à peu, ensuite parce que l'état physique de ces sols subit, comme on l'a vu plus haut, une transformation très défavorable au point de vue de la décomposition des matières organiques et de la croissance des plantes. *On ne peut remédier à ces défauts qu'en prenant soin de conserver et d'augmenter le taux d'humus dans le sol par des mesures appropriées.*

Dans les cas enfin où un excès d'humus est nuisible à la croissance des plantes utiles, il faut veiller ou bien à diminuer cet excès ou bien à transformer les propriétés nuisibles de l'humus de manière qu'il réponde aux exigences des végétaux que l'on cultive. Quant aux moyens à employer, nous les verrons dans la troisième partie de ce livre.

2. — L'humus comme couverture.

A) **Formation de la couverture.** — En forêt, il se forme, grâce aux déchets du peuplement (feuilles, aiguilles, rameaux, écailles de bourgeons, cônes, mousses, gramens, plantes herbacées, sous-arbrisseaux, etc.), une couverture qui, par la décomposition de ces organes végétaux morts, se rapproche peu à peu de la composition de l'humus. La formation de cette couverture morte dépend de diverses circonstances extérieures et suivant le peuplement se fait d'une manière différente.

La composition chimique et physique du sol et les conditions climatériques sont, parmi les circonstances extérieures, celles qui influent le plus sur les quantités de déchets qui s'accumulent à la surface. Sur des sols compacts, riches, profonds et humides, les cimes des arbres sont non seulement mieux développées, mais encore les feuilles, éléments essentiels de la couverture, sont plus grandes et plus nombreuses que sur les sols maigres et secs, en

supposant que le massif ne soit pas trop serré et que la lumière soit suffisante.

Les conditions climatériques ne sont pas de moindre importance pour le développement du feuillage; car celui-ci, toutes choses égales d'ailleurs, est d'autant plus luxuriant que les pluies sont plus abondantes et le climat plus chaud.

Cette dernière influence est nettement mise en évidence par ce fait (dont la constatation est due à R. Weber[1]) que la surface des feuilles de hêtre diminue à mesure que l'altitude augmente. Les chiffres ci-dessous le montrent :

LOCALITÉ.	ALTITUDE.	SURFACE de 100 feuilles en mètres carrés.
—	—	—
	mètres.	
Aschaffenburg.	133	3,414
Hohenau (forêt de Bavière)	685	1,500
— —	1 344	0,910

D'autre part, le degré, la densité du feuillage dépend de l'espèce. Les essences *de lumière* (chêne, pin, mélèze et bouleau) ont une cime plus éclairée et sont par suite moins feuillées que les essences *d'ombre* (hêtre, charme, sapin et épicéa). Enfin, l'aptitude des feuilles ou aiguilles à la décomposition a une influence sur le poids de la couverture. Des feuilles charnues se décomposent plus vite que celles des hêtres ou des chênes, par exemple, tandis que la couverture d'aiguilles se détruit le plus lentement.

Il ne se forme en général de couverture un peu épaisse avec les déchets des arbres seuls que dans les forêts de hêtres ou dans les jeunes massifs pleins de résineux et, à un moindre degré, sous les charmes, les chênes et les bouleaux. A un âge plus avancé, les herbes, les sous-arbrisseaux (bruyères, airelles) et surtout les mousses prennent part à la formation de la couverture et souvent en forte proportion. Suivant le taux d'humidité du sol apparaissent des mousses variées : aux places très humides, des sphaignes et des polytrics : aux endroits frais, des polytrics et des hypnums : dans les

1. E. Ebermayer, *Die gesammte Lehre der Waldstreu*, Berlin, 1876, p. 39.

stations maigres et ensoleillées, des dicranums. En montagne il y a beaucoup plus de mousses qu'en plaine. De même, dans bien des cas, la production de mousse est incomparablement plus grande dans les forêts fraîches de sapin et d'épicéa que dans les peuplements plus clairs et plus secs de pins et de mélèzes.

En réfléchissant au grand nombre des facteurs qui influent sur la quantité des feuilles ou aiguilles et sur la couverture de mousse, on ne doit pas s'étonner que le poids des déchets qui arrivent annuellement au sol soit très variable suivant les localités. Pour s'en faire une idée approchée, considérons les moyennes des déterminations faites pendant quatre années avec des conditions différentes (dans les forêts de l'État bavarois) sous la direction d'EBERMAYER[1].

PEUPLEMENTS.	COUVERTURE ANNUELLE PAR HECTARE en kilogrammes.		
—	Minimum. —	Maximum. —	Moyenne. —
Hêtre.			
Perchis de 30-60 ans.	2 998	6 396	**4 182**
Peuplement presque exploitable de 60-90 ans.	3 269	5 180	**4 094**
Peuplement exploitable de plus de 90 ans. .	2 852	5 032	**4 044**
Épicéa.			
Jeune peuplement au-dessous de 30 ans . .	4 110	6 047	**5 258**
Perchis de 30-60 ans.	1 157	6 090	**3 964**
Peuplement presque exploitable de 60-90 ans.	1 962	6 016	**3 376**
Peuplement exploitable de plus de 90 ans. .	1 685	6 864	**3 273**
Pin sylvestre.			
Perchis de 25-50 ans.	2 101	4 230	**3 397**
Peuplement presque exploitable de 50-75 ans.	2 512	4 055	**3 491**
Peuplement exploitable de 75-100 ans . . .	2 787	6 038	**4 229**

Quand on enlève la couverture à des intervalles de plusieurs années, le poids s'abaisse relativement d'autant plus que l'intervalle est plus long ; c'est-à-dire qu'il n'est pas égal à la somme des poids des couvertures annuelles, mais plus petit. Ceci se comprend si l'on

1. EBERMAYER, *loc. cit.*, p. 44.
2. Les chiffres se rapportent à la couverture complètement desséchée à l'air.

considère que par l'érémacausis la matière organique se volatilise d'autant plus qu'il s'écoule plus de temps entre les récoltes de couverture. Les chiffres ci-dessous, encore empruntés à EBERMAYER[1], donnent une idée tant de la grandeur des différences dans le poids de la couverture suivant les intervalles de récolte que de son poids dans les massifs vierges de tout enlèvement.

PEUPLEMENT.	POIDS DE LA COUVERTURE PAR HECTARE en kilogrammes			
	annuelle.	triennale.	sexennale.	dans des massifs vierges.
Massif plein de hêtre	4 107	8 160	8 460	10 417
Massif plein d'épicéa.	3 537	7 591	9 390	13 857
Massif plein de pin sylvestre .	3 706	8 987	13 729	18 279

Ces chiffres montrent d'abord qu'après trois et six ans la couverture qu'on peut râteler n'est pas devenue trois fois, six fois plus lourde, mais que, dans la forêt de hêtre, au bout de trois ans, elle n'est que le double de la couverture annuelle et, après six ans, elle a le même poids qu'après trois ans. Dans la forêt d'épicéa, après trois ans, sa récolte est 2,2 fois et après six ans, 2,7 fois ce qu'elle est annuellement. Dans la pineraie, ces nombres deviennent 2,5 et 3.

De ces faits on doit conclure que, pour l'érémacausis des feuilles de hêtre, pour leur transformation en humus, il faut en moyenne trois ans. Le poids au bout de six ans peut n'être pas beaucoup plus fort qu'au bout de trois ans ; car on ne trouve à la fin de la sixième année que la couverture des deux années précédentes, les feuilles plus anciennes sont en très grande partie déjà transformées en humus et même complètement détruites. Quant à la couverture d'épicéa, sa décomposition est presque aussi rapide que celle de hêtre ; la couverture sexennale n'est guère que le double de l'annuelle. Si, comme l'indiquent les résultats, elle s'élève au triple de la couverture annuelle, cela tient uniquement à ce qu'elle contient beaucoup de mousses qui se sont développées dans cet intervalle de six ans.

1. EBERMAYER, *loc. cit.*, p. 52.

La décomposition des aiguilles de pin sylvestre est plus lente que celle des aiguilles d'épicéa et des feuilles de hêtre, puisqu'au bout de trois ans le poids de la couverture égale non pas 2 fois, mais 2 fois et demie le poids de la couverture annuelle.

Les aiguilles de pin mettent en moyenne trois ans et demi pour se transformer en humus. L'augmentation relative du poids de la couverture sexennale comparé à celui de la couverture triennale doit être attribuée, chez le pin sylvestre comme chez l'épicéa, à la mousse qui se produit dans l'intervalle des récoltes.

Dans les massifs vierges de tout enlèvement, le poids de la couverture atteint, dans les hêtres, 2 fois et demie, dans les épicéas 4 fois et dans les pins sylvestres 5 fois celui de la couverture annuelle.

B) **Composition chimique de la couverture.** — Parmi les matières organiques qui forment les 78 à 86 p. 100 de la couverture complètement desséchée à l'air, les composés non azotés (hydrates de carbone, matières grasses, acides organiques, matières extractives, etc.) forment la majeure partie de la masse ; les principes azotés sont beaucoup plus rares. D'après les rares analyses de H. Krutzsch[1] et de R. Hofmann[2] sur ce sujet, les matériaux de la couverture contiennent en pour-cent de matière complètement sèche :

	FEUILLES		AIGUILLES			MOUSSES		
	de hêtre.	de chêne.	d'épicéa.	de pin sylvestre.	de mélèze.	hypnum.	polytrichum.	climarium.
	—	—	—	—	—	—	—	—
Azote. .	0.80	1.06	1.35	1.89	0.88	0.99-1.81	1.07	1.69

Si l'on compare ces taux à ceux des pailles employées dans la fabrication de fumiers, lesquelles renferment 0,3 — 0,9 (en moyenne 0,6) d'azote, on voit que les éléments de la couverture sont plus riches en azote.

On a plus de renseignements sur les principes minéraux qui, d'a-

1. H. Krutzsch, *Chemischer Ackersmann,* 1886, p. 158 et 162.
2. R. Hofmann, *Landwirthschaftliche Versuchsstationen,* vol. I, p. 270.

près les travaux de E. Ebermayer[1] et de E. Wolff[2], existent dans les matériaux de la couverture et dans les pailles avec les proportions suivantes :

1 000 parties de matière séchée à 100° contiennent :

		CENDRES pures.	POTASSE.	SOUDE.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	OXYDE DE FER.	ACIDE phosphorique.	ACIDE sulfurique.	SILICE.
Couverture de feuilles de hêtre.	Maximum . .	99.1	8.31	1.78	31.81	6.92	2.28	5.85	2.51	50.80
	Minimum . .	40.3	0.91	0.15	16.99	2.14	0.66	1.43	0.53	5.95
	Moyenne.	55.76	2.97	0.60	24.62	3.64	1.54	3.14	1.09	18.16
Couverture d'aiguilles d'épicéa.	Maximum . .	101.9	2.42	1.40	38.50	4.19	1.93	3.31	1.18	57.40
	Minimum . .	31.1	0.95	0.22	5.36	0.74	0.22	1.26	0.43	3.86
	Moyenne.	45.27	1.61	0.56	20.27	2.32	0.93	2.14	0.70	16.54
Couverture d'aiguilles de sapin.	Maximum . .	52.7	4.51	0.68	38.67	3.05	1.70	4.08	1.01	4.97
	Minimum . .	19.9	1.06	0.37	6.23	1.18	0.22	2.19	0.78	0.51
	Moyenne.	37.85	2.63	0.53	24.28	2.52	1.08	2.80	0.93	2.35
Aiguilles de mélèze tombées		40.0	1.83	0.51	8.79	2.76	1.03	1.50	0.65	22.81
Feuilles de chêne.	tombées . . .	43 9	4.03	0.76	17.07	6.02	0.95	2.10	0.75	10.85
	mortes. . . .	49.0	1.61	0.30	23.83	1.94	0.30	3.96	2.17	15,17
Aiguilles de pin sylvestre.	Maximum . .	20.0	2.14	1.03	10.31	2.53	1.10	1.51	0.60	2.30
	Minimum . .	10,7	0.95	0.19	2.57	0.76	0.13	0.76	0.42	1.39
	Moyenne.	14.65	1.52	0.64	5.95	1.51	0.49	1.16	0.53	2.06
Branches de pin sylvestre mortes		11.91	0.43	0.12	3.69	0.45	0.83	0.30	0,30	3.65
Mousses diverses.	Maximum . .	39.2	8.76	2.66	8.23	2.92	2.90	6.16	1.81	9.02
	Minimum . .	23.2	6.96	0,67	3.34	1.79	0.64	2.87	1.54	2.17
	Moyenne.	30.98	7.61	1.42	5.47	2.51	1.82	4.78	1.65	4.88
Fougères . . (moyennes).		67.6	24.05	2.73	8.30	4.69	1.11	5.53	2.35	13.74
Bruyère commune.		20.8	2.68	1,37	4.47	1.95	0.85	1.40	0.85	6,17
Jones et carex		55.9	22.05	3.65	4.21	3.56	1.99	5.01	1.56	7.86
Roseaux		41.7	8.33	0.28	4.06	1.30	0.79	2.76	0.67	24.36
Genêt à balai		18.1	6.15	0.40	2.89	2.13	0.84	1.51	0.59	1.68
Paille de blé		53.7	7.33	0.74	3.09	1.33	0.33	2.58	1.32	36.35
— de seigle		47.9	9.22	1,03	4.11	1.30	0.50	2.46	1.30	27.01
— d'orge		48.0	10.97	1.98	3.73	1.25	0.33	2.15	1.78	24.97
— d'avoine		47.0	10.40	1.36	4.16	1.90	0.68	2.20	1.45	22.83

L'examen de ces chiffres[3] montre que, parmi les éléments minéraux nutritifs, les terres alcalines et surtout la chaux dominent dans

1. E. Ebermayer, *loc. cit.*, p. 108.

2. E. Wolff, *Aschenanalysen von landw. Producten.* Berlin, 1871.

3. Ces chiffres ne donnent naturellement qu'une valeur approchée ; car la composition chimique des végétaux varie extraordinairement suivant les localités.

la couverture des forêts, tandis que les alcalis sont en faible proportion ; la comparaison avec les pailles agricoles fait ressortir la plus grande richesse de celles-ci en alcalis et leur plus grande pauvreté en terres alcalines. Seules les mousses de forêt et surtout les fougères et les cypéracées font exception ; elles sont très riches en potasse. Les taux d'acide phosphorique de la couverture des forêts et des litières agricoles n'offrent pas de différences saisissantes.

C) **Propriétés physiques de la couverture.** — Pour l'appréciation d'un certain nombre de points importants en pratique, il faut surtout connaître les rapports de la couverture avec l'eau et la chaleur.

Les *rapports de la couverture avec l'eau* s'apprécient le mieux quand on opère dans des conditions aussi rapprochées que possible de celles de la nature sous la libre influence des éléments atmosphériques. J'ai fait des essais à ce sujet[1] dans des lysimètres protégés contre l'échauffement latéral et disposés de façon qu'on pût aisément déterminer l'humidité de la matière en expérience ainsi que les quantités d'eau évaporées et infiltrées. Les déterminations ont été faites chaque semaine pendant une saison de végétation (du 1er avril au 30 septembre).

Voici les résultats obtenus :

Taux d'eau de la couverture en pour-cent du volume.

SAISON de végétation.	ÉPAISSEUR DE LA COUCHE.								
	5 centimètres.					30 centimètres.			
	Feuilles		Aiguilles		Mousse.	Feuilles		Aiguilles	
	de chêne.	de hêtre.	d'épicéa.	de pin sylvestre.		de chêne.	de hêtre.	d'épicéa.	de pin sylvestre.
1886 .	57.26	»	44.75	»	25.43	46.58	40.58	44.02	38.99
1887 .	44.28	»	33.21	»	24.22	44.26	39.05	39.29	33.57
1888 .	37.31	31.99	34.13	32.88	31.69	»	»	»	»
Moyenne .	46.28	»	37.36	»	27.11	45.42	39.81	41.65	36.28

1. E. Wollny, *Forschungen*, etc., vol. X, 1887, p. 428, et vol. XIII, 1890, p. 134.

Taux d'eau sous des épaisseurs diverses de couverture.

ÉPAISSEUR de la couverture en centimètres.	FEUILLES DE CHÊNE.			AIGUILLES D'ÉPICÉA.			MOUSSE.
	1886.	1887.	Moyenne	1886.	1887.	Moyenne.	1888.
5	57.26	44.28	50.77	44.75	33.21	38.98	31.69
10	57.25	48.74	52.99	48.71	32.80	40.76	41.70
15	»	»	»	»	»	»	46.45
20	51.92	54.27	53.09	42.83	39.23	41.03	50.10
25	»	»	»	»	»	»	47.61
30	46.58	44.26	45.42	44.02	39.29	41.65	44.50

On conclut de ces chiffres que :

1° *Le feuillage de chêne a le plus fort taux d'eau, puis viennent en décroissant les feuilles d'épicéa, de hêtre et de pin sylvestre ; la mousse a le taux le moins élevé ;*

2° *Les différences s'atténuent quand l'épaisseur de la couverture augmente ;*

3° *En moyenne, le taux d'eau de la couverture augmente avec son épaisseur jusqu'à une certaine limite (20 centimètres), à partir de laquelle il diminue.*

Des déterminations isolées qu'on omet ici pour abréger il résulte que :

4° *Les oscillations du taux d'eau de la couverture suivant les influences atmosphériques sont d'autant plus faibles que cette couverture est plus épaisse ;*

5° *Aucune couverture ne subit sous une faible épaisseur (5-10 centimètres) une aussi grande variation dans son taux d'eau que la couverture de mousse.*

Les nombres précédents n'expriment pas la faculté d'imbibition, mais seulement le taux d'eau après qu'une portion de l'eau de pluie s'est infiltrée et qu'une autre s'est dégagée par évaporation. Il faut donc tenir compte de ces deux portions pour avoir une idée exacte du phénomène.

Eau d'infiltration exprimée en millimètres.

SAISON de végétation.	QUANTITÉ de pluie.	ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE : 5 centimètres.					ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE : 30 centimètres.			
		Chêne.	Hêtre.	Épicéa.	Pin sylvestre.	Mousse.	Chêne.	Hêtre.	Épicéa.	Pin sylvestre.
1886 . .	713,2	439,8	»	444,8	»	374,8	526,5	526,5	486,7	493,3
1887 . .	466,3	197,3	»	216,3	»	181,5	331,8	339,3	347,8	244,6
1888 . .	823,0	528,6	524,8	595,1	529,5	448,3	»	»	»	»
MOYENNE .	667,5	388.6	»	418.7	»	334,8	429,1	427,8	417,2	368,9

Eau d'infiltration sous des épaisseurs diverses de couverture.

ÉPAISSEUR de la couverture en centimètres.	FEUILLES DE CHÊNE.			AIGUILLES D'ÉPICÉA.			MOUSSE.
	1886.	1887.	Moyenne.	1886.	1887.	Moyenne.	1888.
5	439,8	197,3	318,6	444,8	216,3	330,6	418,3
10	487,0	183,8	335,4	481,9	183,9	332,9	465,0
15	»	»	»	»	»	»	533,2
20	529,0	423,8	476,4	488,1	365,3	426,7	592,6
25	»	»	»	»	»	»	589,9
30	526,5	331,8	429,1	486,7	347,8	417,3	580,4

On peut déduire de ces chiffres que :

1° *A égalité d'apports atmosphériques et de toutes les autres conditions, les taux de l'eau qui s'infiltre après avoir traversé des feuilles de chêne, de hêtre ou des aiguilles d'épicéa et de pin sylvestre sont sensiblement les mêmes et notablement plus grands que ceux que fournit la mousse ;*

2° *La quantité d'eau d'infiltration augmente avec l'épaisseur de la couche jusqu'à une certaine limite (20 centimètres) à partir de laquelle cette quantité décroît.*

Les pertes par évaporation de ce même matériel sont consignées dans le tableau suivant :

Eau évaporée exprimée en millimètres.

SAISON de végétation.	QUANTITÉ de pluie.	ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE : 5 centimètres.					ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE : 30 centimètres.			
		Chêne.	Hêtre.	Épicéa.	Pin sylvestre.	Mousse.	Chêne.	Hêtre.	Épicéa.	Pin sylvestre.
1886 . .	713,2	279,2	»	275,5	»	340,2	167,6	165,0	216,7	198,0
1887 . .	466,3	262,9	»	244,2	»	281,5	108,2	106,9	104,7	205,9
1888 . .	823,0	293,2	301,4	227,6	294,5	380,9	»	»	»	»
MOYENNE .	**667,5**	**278,4**	»	**249,1**	»	**334,2**	**137,9**	**135,9**	**160,7**	**201,9**

Eau d'évaporation sous des épaisseurs diverses de couverture.

ÉPAISSEUR de la couverture en centimètres.	FEUILLES DE CHÊNE.			AIGUILLES D'ÉPICÉA.			MOUSSE.
	1886.	**1887.**	Moyenne.	**1886.**	**1887.**	Moyenne.	**1888.**
5	279,2	262,9	**271,0**	275,5	244,2	**259,8**	380,9
10	225,3	282,2	**253,8**	229,8	279,4	**254,6**	358,2
15	»	»	»	»	»	»	295,5
20	165,8	119,2	**142,5**	191,5	87,3	**139,4**	230,6
25	»	»	»	»	»	»	226,3
30	167,5	108,2	**137,8**	216,7	104,2	**160,4**	224,9

Il ressort de ces chiffres que :

1° *C'est la couverture de mousse, qui évapore le plus d'eau ; après, vient celle de pin sylvestre, puis les autres avec de faibles différences ;*

2° *En moyenne, les quantités d'eau évaporée sont d'autant moindres que la couverture est plus épaisse ; mais, à partir d'une certaine limite (20 centimètres), elles restent à peu près constantes, quelle que soit l'épaisseur.*

Avec ces données sur l'eau d'infiltration et d'évaporation, on peut

se rendre approximativement compte des causes qui font varier le taux d'eau des couvertures.

Tout d'abord, en comparant les chiffres, on voit que l'eau infiltrée est inversement proportionnelle à l'eau évaporée, si bien qu'en les additionnant on retrouve presque exactement la quantité d'eau tombée pendant la durée de l'expérience.

Donc, c'est en général surtout la faculté d'imbibition qui est à considérer pour l'évaluation des quantités d'eau retenues par la couverture. Si on compare son taux d'eau avec celui des sols minéraux, on voit que cette faculté d'imbibition est assez élevée (p. 394). Les nombres qu'on aurait trouvés pour le taux d'eau d'une couverture partiellement décomposée ou transformée en humus seraient encore plus grands que ceux de mes expériences, où je n'ai employé que des couvertures fraîches dont la décomposition était à peine commencée.

C'est surtout l'évaporation qui agit pour diminuer les taux d'eau dans les diverses périodes comme c'est la perméabilité de la couverture qui agit pour l'augmenter. Survienne une pluie, l'eau est d'abord employée à remplacer celle qui vient de s'évaporer jusqu'à ce que le matériel soit saturé. Au delà, l'eau s'infiltre. Il est clair que plus il y aura d'eau perdue de ces deux façons, moins il en restera dans la couverture.

Les observations précédentes montrent qu'en général l'infiltration, toutes choses égales, est plus intense sous les couvertures de feuilles ou de résineux que sous la mousse. Celle-ci *retient* plus d'eau que les feuilles et les aiguilles. Si pourtant la mousse *contient* moins d'eau que les autres couvertures, cela ne peut tenir qu'à son plus grand pouvoir d'évaporation. La couverture de mousse perd dans les périodes de sécheresse incomparablement plus d'eau que les couvertures de feuilles ou d'aiguilles ; il n'est pas rare que, dans les cas extrêmes, elle en perde tant que son taux s'abaisse au minimum, à celui qui correspond à sa complète dessiccation à l'air. Ces différences de taux tiennent surtout à des différences de capillarité.

Dans les couvertures où les feuilles gisent horizontalement, la poussée capillaire est constamment interrompue, si bien que l'eau ne peut arriver à la surface.

Dès lors, les couches superficielles de feuilles se dessèchent et il se forme ainsi une croûte sèche qui s'oppose énergiquement à l'évaporation en empêchant l'action directe des facteurs qui régissent ce phénomène. La couverture d'aiguilles se comporte de la même façon ; la présence de vides non capillaires retarde l'ascension capillaire de l'eau et facilite ainsi le dessèchement des couches superficielles. Les aiguilles de pin, moins étroitement serrées que celles d'épicéa et par suite plus perméables, évaporent comparativement plus d'eau et c'est probablement à cause de cela que la couverture d'aiguilles de pin sylvestre contient moins d'eau que celle d'aiguilles d'épicéa. Quant à la mousse, elle est pourvue de nombreux et étroits espaces capillaires et bons conducteurs, de sorte que la perte de l'eau superficielle par l'évaporation est plus vite et plus facilement réparée que dans toute autre couverture.

Si le taux de l'humidité ainsi que celui de l'eau d'infiltration augmentent dans certaines limites (jusqu'à 20 centimètres) avec l'épaisseur de la couverture, tandis que le taux de l'eau évaporée diminue, cela tient à ce que les parties les plus humides sont situées d'autant plus profondément que la couverture est plus épaisse. Avec une faible épaisseur, les couches les plus humides sont si près de la surface, que la perte par évaporation est facilement remplacée par la montée capillaire de l'eau, ce qui amène l'évaporation de plus fortes quantités d'eau qu'avec une plus grande épaisseur où les couches les plus humides sont si éloignées de la surface que la capillarité ne s'y exerce pas ou ne s'y exerce qu'imparfaitement. La couverture mince se desséchant plus que la couverture épaisse, les doses d'humidité et d'eau d'infiltration doivent y être moindres que dans les dépôts plus épais, parce que, dans ceux-ci, une moins grande fraction des précipitations atmosphériques est employée à remplacer l'eau évaporée.

Si, au delà des limites indiquées, le taux d'humidité de la masse diminue ainsi que celui de l'eau infiltrée, cela tient évidemment à ce que l'eau apportée se répartit dans une couche plus épaisse qui cède moins d'eau par le dessous, parce que des quantités d'eau très importantes sont retenues dans un volume relativement grand.

Les *relations de la couverture avec la température* ont été mesu-

rées par moi de la façon suivante[1]. Des cadres en fortes planches de 35 centimètres sur 35 centimètres et 20 centimètres de hauteur furent enfoncées jusqu'au bord dans une place libre du champ d'expériences et remplis de diverses couvertures ; la température fut mesurée à 10 centimètres de profondeur, chaque jour, à 7 heures du matin et à 5 heures du soir. Pour pouvoir comparer, on remplit un cadre avec du sable calcaire humique à grains fins. Voici quelques chiffres extraits de la série obtenue.

1887	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE A 10 CENTIMÈTRES de profondeur.					VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE				
		Terre.	Pin sylvestre.	Épicéa.	Chêne.	Mousse	Terre.	Pin sylvestre.	Épicéa.	Chêne.	Mousse
Avril. . . .	7,30	8,89	8,27	8,51	8,50	8,49	10,25	11,25	10,18	10,62	9,90
Mai.	9,88	11,82	12,42	11,89	12,16	12,35	9,95	8,52	7,92	7,33	6,50
Juin	15,95	19,28	19,75	20,10	20,72	19,11	12,60	9,13	9,48	9,00	7,83
Juillet . . .	19,73	23,03	22,80	24,31	23,40	22,28	11,92	6,30	6,50	5,77	5,07
Août	16,28	18,95	19,23	20,26	19,27	18,62	11,90	7,32	6,80	7,33	6,32
Septembre .	16,21	15,11	15,56	16,20	15,39	14,85	9,53	5,18	4,55	5,18	4,30
Moyenne. .	»	16,18	16,34	16,93	16,62	15,95	11,02	7,95	7,57	7,54	6,65

Ces nombres font voir que :

1° *La terre est en moyenne plus froide que les matériaux des couvertures, à l'exception de la mousse ;*

2° *C'est la couverture d'épicéa qui s'échauffe le plus, puis le feuillage de chêne et les aiguilles de pin sylvestre ; c'est la mousse qui s'échauffe le moins ;*

3° *Les variations de température sont sensiblement moindres dans la couverture des forêts que dans le sol.*

En général, ces chiffres accusent des différences de température relativement faibles entre la terre et les diverses couvertures.

Ce qui frappe surtout, c'est le faible échauffement de la terre comparé à celui des couvertures. En y réfléchissant, et en considérant les différences très importantes ci-dessus dans les oscillations

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. X, 1887, p. 417.

de température soit de la terre, soit des couvertures, on arrive à penser que, dans le cas précédent comme dans beaucoup d'autres semblables, on ne peut, à l'aide des moyennes de température, se faire une idée exacte sur les rapports thermiques des matériaux étudiés ; la marche de la température doit y être autrement représentée.

Il n'est sans doute pas indifférent, pour juger ces divers rapports, de savoir de quelles déterminations isolées est faite la température moyenne ; car, une même moyenne peut être formée de valeurs extrêmes très différentes. Il vaut mieux, pour avoir une idée nette de la marche de la température, représenter les oscillations dans l'échauffement comme on le voit dans le tableau suivant qui donne les moyennes mensuelles des observations du matin (M) et du soir (S) avec leurs différences (D).

Température à 10 centimètres de profondeur.

1887.	TERRE.			PIN SYLVESTRE.			ÉPICÉA.			CHÊNE.			MOUSSE.		
	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.
Avril . . .	6,27	11,51	5,24	5,32	11,22	5,90	5,97	11,11	5,14	5,87	11,12	5,26	6,15	10,83	4,68
Mai	9,43	14,17	4,74	10,46	14,38	3,92	10,03	13,76	3,73	10,90	14,02	3,12	11,15	13,50	2,35
Juin. . . .	15,88	22,66	6,78	17,84	21,66	3,82	18,43	22,38	3,95	19,19	22,24	3,05	17,82	20,44	2,58
Juillet. . .	19,57	26,48	6,91	21,23	24,37	3,14	22,76	25,86	3,10	22,04	24,76	2,72	21,16	23,39	2,23
Août . . .	15,67	22,24	6,57	17,80	20,66	2,86	18,93	21,58	2,65	17,75	20,78	3,03	17,56	19,67	2,11
Septembre.	12,60	17,62	5,03	14,42	16,69	2,27	15,32	17,02	1,64	14,24	16,55	2,31	14,10	15,59	1,49
Moyenne.	13,24	19,11	5,87	14,51	18,16	3,65	15,25	18,62	3,37	15,00	18,24	3,24	14,66	17,23	2,57

De ces nombres il résulte que :

1° *Le refroidissement nocturne et l'échauffement diurne sont plus grands pour la terre que pour les diverses couvertures ;*

2° *Les oscillations journalières de température sont donc sensiblement moindres dans ces dernières ;*

3° *Parmi les couvertures, c'est celle d'aiguilles d'épicéa qui s'échauffe le plus dans le jour et celle de mousse qui s'échauffe le moins; les deux autres, celles de chêne et de pin sylvestre, tenant le milieu ;*

4° Le refroidissement nocturne est maximum dans la couverture de pin sylvestre; puis viennent celles de mousse, d'épicéa et de chêne.

En somme, les matériaux de la couverture se comportent vis-à-vis de la chaleur comme l'humus, c'est-à-dire que *l'écart entre les températures extrêmes est bien moindre que dans les sols minéraux; les couvertures s'échauffent moins que ceux-ci quand la température s'élève, elles se refroidissent moins quand elle s'abaisse.*

Les causes de ces faits résident dans des différences de conductibilité.

Les matériaux de la couverture, enfermant une assez grande quantité d'air par suite de leur texture plus ou moins poreuse, conduisent plus mal la chaleur que la terre où les particules sont étroitement juxtaposées et emprisonnent beaucoup moins d'air. Ajoutons que la matière organique dont est faite la couverture a une conductibilité plus faible que les matières minérales qui constituent la masse du sol (p. 364). Il faut en outre tenir compte de cette circonstance que les couvertures, à cause de leur taux d'eau plus élevé, ont une plus grande capacité calorifique et exigent dès lors, pour s'échauffer d'un degré, plus de chaleur que la terre dont la chaleur spécifique est plus faible, vu son moindre taux d'humidité.

La mauvaise conductibilité des feuilles et des aiguilles des arbres forestiers est aussi la principale cause de leur moindre refroidissement nocturne comparé à celui de la terre.

La composition des divers éléments des couvertures et la façon dont ils sont empilés ont une influence prépondérante sur les différences qu'elles présentent au point de vue de la température.

Les courtes aiguilles d'épicéa se juxtaposent plus étroitement et forment une masse moins poreuse que les éléments des autres couvertures. Elles ont donc une meilleure conductibilité et s'échauffent davantage. La couverture de feuilles de chêne se comporte de même; les feuilles gisent horizontalement et s'empilent en couches serrées, tandis que les aiguilles de pin sylvestre, à cause de leur longueur, et les hypnums à longue tige forment une masse plus poreuse et enferment une assez grande quantité d'air qui s'oppose à un fort échauffement.

Si le refroidissement nocturne n'atteint pas le même degré dans le cas où les matériaux sont étroitement juxtaposés, cela tient surtout à ce que l'abaissement nocturne de la température ne dépend pas seulement de la conductibilité, mais encore de la résistance qui s'oppose à la pénétration de l'air froid de la nuit dans la couverture. Étant donnée la porosité de la couverture d'aiguilles de pin, l'air chaud qu'elle contient y est plus facilement remplacé la nuit par l'air froid que dans les couvertures plus compactes d'aiguilles d'épicéa et de feuilles de chêne. Ces dernières se refroidissent donc moins la nuit. Les différences signalées plus haut ne se présentent pas les mêmes partout et dépendent essentiellement du mode de superposition des matériaux.

D) Dans la couverture des forêts la *formation de l'humus* se fait de différentes manières suivant les conditions extérieures, comme on l'a déjà montré précédemment (p. 275 et 284). Si elles sont favorables à l'érémacausis, il se forme du *terreau* en couche mince, parce que l'active décomposition des détritus végétaux s'oppose à une forte accumulation de dépôts, tandis que l'*humus brut* et la *tourbe sèche* se présentent généralement en couches épaisses, parce que les agents de décomposition, ne pouvant développer leur plein effet à cause des conditions de climat et de végétation des arbres, provoquent la putréfaction des matières organiques.

La transformation en humus se fait plus ou moins vite pour les divers arbres, généralement en 2-3 ans pour les feuillus et en 3-4 ans pour les résineux, quelquefois même en 5-8 ans.

E) **Influence de la couverture sur la fertilité du sol forestier.** — L'action bienfaisante de l'humus en forêt tient à plusieurs causes, d'abord à ce que les arbres y étendent leurs racines et y développent de nombreuses radicelles absorbantes, grâce auxquelles ils s'approprient les matières nutritives de l'humus. Cette absorption ne se fait pas directement, mais, comme nous l'avons vu plus haut (p. 384), par l'intermédiaire de champignons vivant en symbiose avec les racines (mycorhize).

En outre, l'humus de la couverture enrichit le sol et surtout les

couches supérieures en matières organiques, amenant dans la composition physique et chimique du sol ces modifications heureuses qui résultent surtout du mélange des matières humiques avec les éléments minéraux et dont il a été suffisamment question précédemment. Ces matières humiques du sol forestier ne proviennent pas du reste exclusivement de la couverture, mais aussi, quoique pour une plus faible part, des racines qui meurent chaque année (p. 269 et 275).

Les fonctions *chimiques* les plus importantes de la couverture résultent sans conteste de ce que, par sa décomposition, les principes minéraux et azotés (sels ammoniacaux, amides) facilement assimilables sont utilisés pour l'alimentation des arbres après qu'ils ont été dissous par les précipitations atmosphériques et mis ainsi à portée des racines. Les arbres, grâce à leur puissant système radiculaire s'étendant plus loin et plus bas que celui des plantes agricoles, peuvent extraire beaucoup plus de nourriture des combinaisons insolubles qui se trouvent dans le sol ; mais la quantité absorbée par cette voie reste bien en dessous de celle qui est fournie par l'érémacausis des matières organiques de la couverture.

En général, les essences forestières ne s'alimentent convenablement, la production ligneuse ne s'améliore en quantité et en qualité que si l'on rend au sol l'intégralité des matières nutritives contenues dans tous les détritus forestiers (feuilles, aiguilles, branches mortes, mousses et autres restes végétaux).

Les matériaux de la couverture et l'humus qui en provient sont l'engrais naturel du sol forestier.

Quelques recherches faites par J. Schrœder[1] et E. Ramann[2] montrent comment se comportent les matières minérales vis-à-vis des eaux atmosphériques. Le premier a trouvé qu'il n'était pas nécessaire que la couverture fût entièrement décomposée pour que les matières minérales passassent dans le sol ; une bonne quantité est déjà auparavant dissoute par les eaux météoriques, comme le montrent les

1. J. Schrœder, *Forstchemische und pflanzenphysiologische Untersuchungen.* Dresden, 1878.

2. E. Ramann, *Forstliche Bodenkunde und Standortslehre.* Berlin, 1893, p. 276.

chiffres suivants exprimant (en centièmes de chaque substance) les éléments dissous :

	POTASSE.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	OXYDE de fer.	ACIDE phosphorique.	ACIDE sulfurique.
D'une couverture de hêtre . .	52.6	4.5	19.6	1.5	19.7	55.3
De branches mortes d'épicéa sans écorce	47.8	7.9	20.3	5.0	37.9	86.2

On voit que la potasse et l'acide sulfurique sont dissous le plus facilement, l'acide phosphorique et la magnésie en quantité moindre ; c'est la chaux et le fer qui sont les plus rebelles.

L'objection que les modifications éprouvées par la couverture mise en contact avec de grandes quantités d'eau n'étaient pas comparables à celles qu'elle éprouvait dans les conditions naturelles a été détruite par les recherches de E. Ramann, qui laissa des feuilles de chêne et ensuite des aiguilles d'épicéa exposées sur un pluviomètre à toutes les intempéries, et montra que l'action des pluies était semblable à celle d'un lessivage dans une certaine quantité d'eau.

1 000 parties de couverture complètement desséchée ont perdu au bout d'un an :

	POTASSE.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	ACIDE phosphorique.	SILICE.	CENDRES pures.
Feuilles de chêne . .	2.05	0.44	0.35	0.63	0.17	3.92
Aiguilles d'épicéa . .	0.83	0.47	0.18	0.07	0.22	—

En un an, 40 p. 100 de la potasse existant primitivement dans les feuilles de chêne ont été dissous et une proportion plus grande encore (50 p. 100) dans les aiguilles d'épicéa.

Il est probable que la première portion des sels solubles se dissout vite ; on peut le penser d'après un de mes essais où, en mélangeant des feuilles de hêtre avec une quantité d'eau égale au triple du poids de la substance sèche, j'ai obtenu, déjà en 24 heures, la dissolution

de 49.5 p. 100 de la potasse totale et de 22.1 p. 100 dans les deux jours suivants.

En forêt, l'érémacausis va si vite, qu'elle dépasse la lixiviation, puisque les feuilles décomposées sont plus riches en principes minéraux que celles qui viennent de tomber. C'est ce que montrent les chiffres suivants empruntés à une expérience de E. RAMANN :

Composition centésimale de la substance sèche.

	POTASSE.	CHAUX.	MAGNÉSIE.	ACIDE phosphorique.	SILICE.	CENDRES pures.
Feuilles de chêne — à leur chute. . . .	0.487	2.303	0.544	2.189	1.507	7.501
Feuilles de chêne — 2 ans après	0.133	3.241	0.180	2.200	5.476	11.210
Aiguilles d'épicéa — à leur chute. . . .	0.173	1.374	0.071	0.203	2.573	4.765
Aiguilles d'épicéa — 1 an 3/4 après . . .	0.135	2.229	0.164	0.292	4.557	8.520

On ne possède encore aucune expérience relative à l'action dissolvante de l'eau sur l'humus acide qui se forme dans des conditions défectueuses de décomposition. E. RAMANN pense que, dans ce cas, la dissolution est bien plus active et s'étend même aux terres alcalines quand la décomposition est très ralentie.

L'influence qu'exerce la couverture sur la composition chimique des couches profondes du sol forestier est très différente suivant que les détritus se décomposent dans des conditions favorables ou non, suivant donc qu'il se forme soit du terreau, soit de l'humus brut ou de la tourbe. C'est à C. EMEIS [1], P. E. MÜLLER [2] et E. RAMANN [3] que nous devons la connaissance de ces différences.

La modification qu'éprouve un sol de terreau se manifeste dans les analyses suivantes faites sur un sol de sable diluvien de l'inspec-

1. C. EMEIS, *Waldbauliche Forschungen und Betrachtungen*. Berlin, 1876.

2. P. E. MÜLLER, *Studien über die natürlichen Humusformen*. Berlin, 1887.

3. E. RAMANN, *Der Ortstein und ähnliche Secundärbildungen in den Diluvial- und Aluvialsanden* (*Jahrbuch d. k. preuss. geologischen Landesanstalt für 1885*. Berlin, 1886). — *Ueber Bildung und Cultur des Ortsteins* (*Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 1886*. 1er fasc.). — *Die Waldstreu und ihre Bedeutung für Boden und Wald*. Berlin, 1890. — *Forstliche Bodenkunde und Standortslehre*. Berlin, 1893, p. 234.

tion d'Eberswalde peuplé de pins bien venants de 100-120 ans, avec un sous-bois de hêtres de 40-60 ans.

Coupe du sol : 16 centimètres de sable humique, puis 30 centimètres de sable jaune brun sur du sable blanc.

100 parties de sol renferment :

ÉLÉMENTS dosés.	SABLE faiblement humique.			SABLE jaune brun.			SABLE BLANC.		
	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble.	Total.	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble.	Total.	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble.	Total.
Potasse	0.020	0.96	0.98	0.035	1.19	1.23	0.048	1.04	1.09
Chaux	0.019	0.36	0.38	0.041	0.43	0.47	0.041	0.32	0.36
Magnésie	0.025	0.06	0.08	0.052	0.07	0.12	0.055	0.06	0.12
Oxyde de fer. . .	0.197	0.69	0.89	0.215	0.76	0.98	0.241	0.68	0.92
Alumine.	0.174	2.84	3.01	0.272	2.40	2.67	0.132	2.48	2.61
Acide phosphorique	0.040	0.05	0.09	0.068	0.04	0.11	0.030	0.07	0.10

On voit que c'est la couche superficielle qui s'est décomposée le plus ; la lixiviation l'a appauvrie en principes minéraux ; la zone suivante est la mieux pourvue en matières nutritives solubles et à un taux moyen de substances insolubles, tandis que le sable blanc représente le sol brut encore peu attaqué. Les sols de lehm offrent des rapports analogues, quoique moins nets, parce que la pénétration de l'eau est bien plus lente.

Quand le sol est couvert d'humus brut, la décomposition des minéraux est incomparablement plus intense que dans le sol de terreau, parce que, sous l'influence des acides humiques dissous, les silicates sont énergiquement décomposés et les alcalis ainsi que les terres alcalines entrent en solution. Comme le pouvoir absorbant du sol est diminué par la présence des acides, les matières solubles sont facilement entraînées dans la profondeur, surtout dans les sols sableux où l'infiltration est considérable.

« La couverture d'humus brut provoque une décomposition rapide du sol et favorise la lixiviation des principes minéraux solubles. » (E. RAMANN.) Les chiffres suivants, tirés d'une expérience de E. RA-

MANN, fournissent un bon exemple des réactions dues à l'humus brut, car les prises d'échantillon ont eu lieu à quelques pas de distance, et néanmoins la couverture d'humus brut a amené des différences très nettes dans la composition chimique du sol :

ÉLÉMENTS DOSÉS.	ÉLÉMENTS SOLUBLES dans l'acide chlorhydrique.		
	Sol de terreau.	Sol couvert de 2 centimètres d'humus brut.	Sol couvert de 7 centimètres d'humus brut.
—	—	—	—
Potasse	0,0107	0,0107	0,0092
Soude	0,0063	0,0071	0,0069
Chaux	0,0875	0,0508	0,0360
Magnésie	0,0440	0,0333	0,0130
Oxyde de manganèse	0,0500	0,0240	0,0150
Oxyde de fer	0,4875	0,4287	0,3375
Alumine	0,5625	0,4287	0,3487
Acide phosphorique	0,0489	0,0320	0,0296
TOTAL	**1,2974**	**1,0163**	**0,7959**

L'action dissolvante des eaux sur le sol couvert d'humus brut est nettement démontrée par ces chiffres. Elle est naturellement d'autant plus intense que le taux de l'eau en humus acide est plus élevé.

Par la décomposition et la dissolution la couche superficielle s'appauvrit en principes minéraux solubles et subit des modifications déjà visibles à l'œil nu. Elle apparaît fortement décolorée, le sable est de teinte claire et les silicates sont décomposés, transformés en grande partie en kaolin blanc. L'humus, abondant à la surface, diminue à mesure qu'on s'en éloigne et le sol prend une couleur gris clair. C'est ce qui a donné l'idée d'appeler de tels sols sable gris ou sable gris de plomb (*Bleisand*).

Cette zone partiellement ou presque complètement épuisée confine par le bas à celle qui n'a encore subi qu'une perte très faible et qui se décompose lentement. Il y a donc dans les sols sablonneux deux couches tout à fait différentes et nettement délimitées : le sable gris où la décomposition est presque achevée et le sable jaune où elle se fait.

Entre les deux il se forme parfois une couche plus ou moins compacte qu'on appelle *alios* (*Ortstein* ou *Orterde*), due à la précipitation, dans la zone de décomposition du sol, des acides humiques

dissous par les eaux météoriques en s'infiltrant. Pour comprendre ce qui se passe, il faut considérer que, tant qu'il y a dans le sol des sels solubles, les matières humiques ne sont pas garanties contre la dissolution, mais qu'elles sont dissoutes et entraînées dans la profondeur par les eaux atmosphériques dès que ces sels ont été enlevés par la lixiviation. Ces conditions sont réalisées dans le sable gris lessivé. Les matières humiques y sont dissoutes par l'eau atmosphérique et gagnent avec elle le sous-sol où, se trouvant en contact avec des couches encore non lessivées dans lesquelles la décomposition amène de nouvelles substances, elles se précipitent recouvrant les grains de sable d'une mince couche de matière organique. *L'alios est donc du sable agrégé par des matières humiques d'abord dissoutes qui se précipitent à nouveau.* (E. Ramann.)

E. Ramann a démontré d'une manière irréfutable que la cause de la formation de l'alios résidait dans les réactions précédentes et il a appuyé sa démonstration de divers exemples, parmi lesquels nous ne citerons que le suivant :

Alios de l'inspection de Hohenbrück en Poméranie.

1. Sable gris, 15-20 centimètres d'épaisseur avec 1.05 p. 100 de matière organique.
2. Alios, 5-8 centimètres d'épaisseur avec 7.28 p. 100 de matière organique.
3. Sable jaune brun au-dessous de l'alios.

ÉLÉMENTS DOSÉS.	SABLE GRIS.			ALIOS.			SABLE JAUNE BRUN.		
	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble dans l'acide chlorhydrique.	Total.	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble dans l'acide chlorhydrique.	Total.	Soluble dans l'acide chlorhydrique.	Insoluble dans l'acide chlorhydrique.	Total.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Potasse	0.0076	0.618	0.626	0.0178	0.754	0.772	0.0085	1.103	1.111
Soude	0.0111	0.617	0.178	0.0033	0.360	0.363	0.0213	0.528	0.549
Chaux	0.0110	0.060	0.071	0.0194	0.170	0.189	0.0254	0.225	0.250
Magnésie	0.0026	0.020	0.023	0.0137	0.028	0.042	0.0401	0.064	0.104
Oxyde de manganèse	0.0032	0.060	0.063	0.0044	0.047	0.051	0.0068	0.026	0.033
Oxyde de fer. . .	0.0964	0.450	0.546	0.1936	0.690	0.884	0.3448	0.760	1.105
Alumine.	0.0268	1.650	1.677	1.5256	2.320	3.845	0.4000	3.210	3.610
Acide phosphorique	0.0052	0.043	0.049	0.2966	0.042	0.338	0.0281	0.043	0.071
Total . .	0.1616	3.068	3.233	2.0744	4.411	6.484	0.8750	5.959	6.833

Tout d'abord, ces chiffres présentent de bien plus grandes différences entre la composition des diverses couches que ceux qui sont relatifs au sol de terreau (p. 427) ; ils montrent spécialement que le sable gris est une zone presque entièrement décomposée et appauvrie en principes minéraux solubles, tandis que l'alios, qui est proprement la zone de décomposition active du sol, renferme la plus grande proportion de matières minérales facilement solubles et une proportion moyenne de ces matières non décomposées ; quant au sable inférieur, il est encore peu altéré ; c'est lui qui est le plus richement doté en principes encore inattaqués.

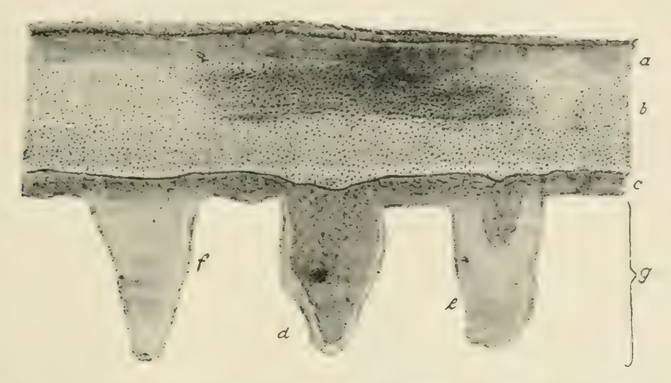


FIG. 51. — Cavités de l'alios à divers degrés de formation (d'après E. RAMANN).

a, sable humique; *b*, sable gris; *c*, alios; *g*, sable jaune (de décomposition); *d-f*, cavités à divers degrés de formation (dessin schématique).

L'alios subit des modifications ultérieures complexes, parmi lesquelles les *formations de cavités* (*Topfbildungen*) offrent un intérêt particulier. Ce sont des enfoncements de la couche d'alios dans les zones inférieures, et on peut les suivre dans toutes leurs phases (fig. 51 et 52). Les limites de ces cavités sont le plus souvent peu nettes ; on observe même des veines de sable humique qui traversent le sable inférieur, et ces veines partent aussi bien des cavités que de la couche normale d'alios (fig. 52). L'intérieur de ces cavités est rempli de sable gris et la zone qui les limite n'est autre que le prolongement de la couche d'alios.

Elles peuvent être dues à ce que l'eau qui se rassemble à la surface de l'alios mouille et attaque cette couche en certains points et

provoque ainsi une dissolution des éléments humiques et leur reprécipitation à la face inférieure de l'alios, ou bien à ce que l'alios a été percé par quelques racines et s'est reformé à ces places. Par là de grandes quantités d'eau s'infiltrent en provoquant dans ces zones inférieures des dissolutions et des décompositions, et en remplissant à nouveau les conditions nécessaires à une formation d'alios. C'est d'abord du sable gris qui remplit ces trous, puis, autour, se forme

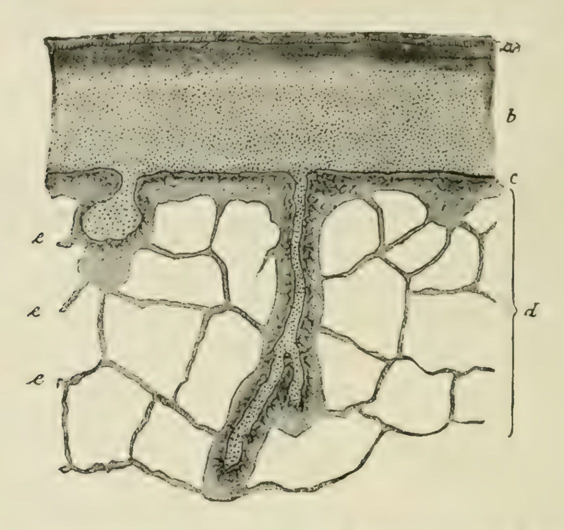


Fig. 52. — Cavités dans l'alios avec remplissage de sable gris (d'après E. Ramann).

a, sable humique; *b*, sable gris; *c*, alios; *d*, sable jaune de décomposition; *e*, veines d'alios.

une gaine d'éléments du sol avec matières humiques à la limite supérieure du sable de décomposition. L'alios a donc cette propriété (qui le distingue de toutes les autres roches) que toute fente produite par les racines ou la décomposition est bouchée à bref délai par une formation nouvelle, si bien que l'alios se montre toujours en couche continue ne semblant pas avoir subi de modification. Les parois des cavités doivent par suite être considérées comme la continuation normale de l'alios. Toutes les ruptures qui s'y produisent ne servent qu'à le reconstituer plus profondément.

D'après les réactions précédentes, on doit conclure qu'il peut se former de l'alios là où il n'y en a pas encore. Ce sera le cas pour les points où des modifications, soit naturelles, soit artificiellement

provoquées, de la couverture amèneront les conditions nécessaires à la formation de l'humus brut (E. RAMANN).

Bien que l'alios doive toujours sa naissance aux mêmes causes, sa manière d'être varie, notamment au point de vue de la consistance.

E. RAMANN distingue trois formes :

1° L'*alios bitumineux,* formant une masse friable, riche en matière organique et située à une faible profondeur ;

2° L'*alios proprement dit,* dur comme la pierre, de teinte brune ou noire, avec un taux moyen de matière organique, en couche d'épaisseur modérée sur des sols encore friables ou meubles. Cette forme domine dans l'Allemagne du Nord ;

3° L'*alios demi-brun ou brun,* très compact, extrêmement difficile à travailler, généralement très épais et recouvert d'une couche d'alios foncé moins compact. Cette forme domine dans le Schleswig-Holstein et le Danemark.

Exposé à l'air et surtout à la gelée, l'alios s'effrite en une masse brune qui prend peu à peu une teinte plus claire par la destruction de sa matière organique.

D'après les analyses complètes faites par E. RAMANN, voici les variations constatées dans la composition chimique des divers alios :

	SOL (POUR 100).			SOLUBLE dans l'acide chlorhydrique (pour 100).		
	Minimum	Maximum.	Moyenne.	Minimum	Maximum.	Moyenne.
Silice (sable)	89.93	97.58	**94.26**	»	»	»
Perte au feu (humus). . .	1.23	8.09	**5.21**	»	»	»
Potasse	0.220	1.293	**0.674**	0.0051	0.0199	**0.0120**
Soude.	0.047	0.768	**0.307**	0.0033	0.0324	**0.0124**
Chaux.	0.025	0.348	**0.157**	0.0116	0.0384	**0.0205**
Magnésie.	0.038	0.106	**0.059**	0.0051	0.0329	**0.0129**
Oxyde de manganèse . . .	0.025	0.051	**0.038**	0.0026	0.0092	**0.0049**
Oxyde de fer	0.143	2.489	**0.696**	0.0108	1.3876	**0.2837**
Acide phosphorique. . . .	0.034	0.338	**0.089**	0.0083	0.2966	**0.0483**
Alumine	1.362	5.685	**2.889**	0.3340	1.5256	**0.6613**

On voit que l'alios est richement pourvu des éléments indispensa-

bles aux végétaux. Il est d'autant plus étonnant qu'ils aient une végétation chétive sur les sols d'alios. En général, au bout de quelques années, les branches supérieures des arbres meurent et finalement les arbres eux-mêmes. Un examen attentif montre que les fines radicelles ne se développent que dans les couches humiques supérieures et à la surface de l'alios.

Si des racines des arbres le traversent çà et là, ce ne sont généralement pas les pivots, mais plutôt quelques racines accessoires qui se ramifient dans le sable de décomposition et fournissent à l'arbre sa principale nourriture. L'action nuisible de l'alios tient tout d'abord à ce qu'il oppose un obstacle mécanique à la pénétration des racines dans les couches profondes et ensuite à ce que sa très faible perméabilité entrave la circulation de l'eau dans le sol, si bien que, dans la saison des pluies, l'eau stagne à la surface et que, dans les longues périodes de sécheresse, quand toute l'eau de la couche supérieure à l'alios est évaporée, il ne peut plus en remonter par capillarité.

L'influence *physique* la plus importante de la couverture réside surtout dans son action sur la texture, la chaleur et l'humidité du sol forestier.

Sous le rapport de la texture, la couverture ralentit beaucoup la pénétration de l'eau dans le sol et atténue l'action coagulante des pluies. Un sol muni de sa couverture sera par suite plus meuble, plus poreux que le même sol privé de couverture. Le durcissement que le sol éprouve à la suite de l'enlèvement prolongé de la couverture et qui se manifeste par la diminution du volume des pores est démontré par les chiffres suivants dus à E. RAMANN :

	PARCELLE RATISSÉE.		PARCELLE NON RATISSÉE.	
	Couche supérieure. 0-11 centimètres.	Couche profonde. 20-31 centimètres.	Couche supérieure. 0-11 centimètres.	Couche profonde. 20-31 centimètres.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
I. Volume des pores .	44.2	45.1	56.7	46.1
II. — .	47.1	45.0	51.0	45.1

Le degré de porosité du sol forestier dépend au reste du mode de décomposition de la couverture, s'il se forme du terreau doux ou de l'humus brut. *Jusqu'à une assez grande profondeur, le sol à terreau*

doux a une texture grumeleuse, tandis que le sol forestier a, sous une couverture d'humus brut, une texture plus compacte. C'est ce que montrent, par exemple, les chiffres ci-dessous empruntés à Ramann :

VOLUME DES PORES DU SOL COUVERT		
de terreau doux.	de 2 centimètres d'humus brut.	de 7 centimètres d'humus brut.
—	—	—
55,4	53,1	46,2

Si l'on compare ces chiffres avec les analyses ci-dessus données (p. 427) des mêmes sols, on se convainc que les différences dans le volume des pores sont proportionnelles à celles des sols en sels solubles ; *la compacité s'accentue à mesure que s'abaisse le taux des sels solubles.*

Cela tient à ce que, en présence des différents sels solubles, les particules du sol gardent leur tendance à former des agrégats (des grumeaux). Cette action des sels ne peut guère se prouver directement dans le sol en place ; mais elle se démontre indirectement par ce fait que la mise en grumeaux, provoquée par les changements de volume du sol dus à la gelée ou aux modifications de l'humidité, persiste plus ou moins, tant qu'il reste des sels solubles dans la couche que surmonte la couverture; c'est le cas pour les sols à terreau doux.

Les grumeaux ou agrégats sont au contraire facilement détruits par l'eau d'infiltration quand les sels sont lessivés sous l'influence des acides humiques de l'humus brut, comme on l'a montré plus haut (p. 427). Celui-ci amène une diminution de la porosité, autrement dit une détérioration du sol au point de vue physique.

E. Ebermayer [1] et moi [2] avons cherché à nous rendre compte par de nombreuses expériences de l'influence que la couverture exerce sur l'échauffement du sol. Les tableaux suivants, résultats de mes essais, font ressortir cette influence. En les examinant, on constate que :

1° *Le sol avec couverture est plus froid que le sol nu en été et quand la température s'élève ; il est plus chaud en hiver [3] et quand la température s'abaisse ;*

1. E. Ebermayer, *Forschungen, etc.*, vol. XIV, 1891, p. 379.
2. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XIII, 1890, p. 143.
3. Voir les observations d'octobre.

2° L'influence de la couverture sur la température s'accroît avec son épaisseur, c'est-à-dire que la température du sol est d'autant plus basse pendant l'été, d'autant plus élevée pendant l'hiver que la couverture est plus épaisse ;

3° La température du sol nu est plus basse à l'heure du minimum diurne, plus élevée à l'heure du maximum diurne que celle du sol pourvu d'une couverture ;

4° Les variations de température dans le sol nu sont notablement plus fortes que dans le sol avec couverture ; elles diminuent d'amplitude à mesure qu'augmente l'épaisseur de cette couverture ;

5° A égalité d'épaisseur, les diverses couvertures ont sensiblement la même action sur l'abaissement ou l'augmentation de chaleur du sol.

Marche mensuelle de la température du sol.

1888	TEMPÉRATURE de l'air.	SOL nu.	AIGUILLES		FEUILLES		MOUSSE.			
			de pin. 2cm,5	d'épicéa. 2cm,5	de chêne. 2cm,5	de hêtre. 2cm,5	2cm,5	5 centimètres.	7cm,5	10 centimètres.
					Température de l'air à 12 centimètres de profondeur.					
Mai.	13,23	15,11	13,38	13,16	13,15	13,17	13,25	12,69	12,50	12,42
Juin.	16,41	18,35	17,34	17,20	17,05	17,03	17,28	16,86	16,66	16,55
Juillet.	15,04	16,57	16,27	16,38	15,70	15,68	16,17	16,00	15,90	15,83
Août.	15,60	17,84	17,06	17,04	16,54	16,55	16,89	16,66	16,56	16,49
Sept.	12,82	14,59	14,45	14,50	14,25	14,24	14,28	14,34	14,43	14,47
Octob.	5,33	7,21	7,30	7,39	7,24	7,20	7,28	7,67	8,11	8,24
Moyenne.	13,07	14,94	14,30	14,28	13,99	13,98	14,19	14,04	14,03	14,00
					Variations de la température.					
Mai.	13,23	9,70	3,48	3,07	3,27	3,43	3,37	2,23	1,78	1,45
Juin.	16,41	11,07	5,51	4,83	5,35	5,73	5,28	3,87	2,92	2,62
Juillet.	15,04	7,93	3,65	3,48	3,63	3,40	3,38	2,27	1,82	1,78
Août.	15,60	9,00	4,57	4,13	4,13	4,07	4,10	2,95	2,37	2,12
Sept.	12,82	7,50	3,80	3,13	3,85	3,65	3,18	2,22	1,68	1,55
Oct.	5,33	5,05	2,97	2,68	3,20	2,92	2,47	1,95	1,52	1,40
Moyenne.	13,07	8,37	4,00	3,55	3,90	3,87	3,63	2,58	2,01	1,82

Marche journalière de la température du sol.

1888.	SOL NU. 0.			AIGUILLES DE SAPIN. 2cm,5.			AIGUILLES D'ÉPICÉA. 2cm,5.			FEUILLES DE CHÊNE. 2cm,5.			FEUILLES DE HÊTRE. 2cm,5.		
	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.
Mai	12,29	17,83	5,54	12,48	14,16	1,68	12,37	13,83	1,46	12,34	13,84	1,50	12,25	13,95	1,70
Juin	15,81	21,25	5,44	16,29	18,37	2,08	16,32	18,09	1,77	16,05	18,05	2,00	15,92	18,14	2,22
Juillet	14,53	18,47	3,94	15,44	17,00	1,56	15,60	17,05	1,45	14,89	16,41	1,52	14,93	16,31	1,38
Août	15,53	20,00	4,47	16,13	17,94	1,81	16,25	17,83	1,58	15,76	17,28	1,52	15,81	17,26	1,45
Septembre	12,57	16,61	4,04	13,66	15,25	1,59	13,78	15,21	1,43	13,39	15,12	1,73	13,47	15,05	1,61
Octobre	6,02	8,36	2,34	6,91	7,72	0,81	7,14	7,70	0,56	6,76	7,79	1,03	6,74	7,70	0,96
Moyenne.	12,79	17,09	4,30	13,48	15,07	1,59	13,58	14,95	1,37	13,20	14,75	1,55	13,18	14,73	1,55

1888.	SOL NU. 5.			MOUSSE. 2cm,5.			MOUSSE. 5cm.			MOUSSE. 7cm,5.			MOUSSE. 10cm.		
	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.	M.	S.	D.
Mai	12,29	17,83	5,54	12,41	13,97	1,56	12,20	13,07	0,87	12,11	12,78	0,67	12,05	12,66	0,61
Juin	15,81	21,25	5,44	16,39	18,18	1,79	16,35	17,36	1,01	16,31	17,02	0,71	16,26	16,85	0,59
Juillet	14,53	18,47	3,94	15,46	16,79	1,33	15,56	16,34	0,78	15,62	16,10	0,48	15,64	15,94	0,30
Août	15,53	20,00	4,47	16,12	17,62	1,50	16,20	17,09	0,89	16,26	16,84	0,58	16,24	16,72	0,48
Septembre	15,57	16,61	4,04	13,66	14,90	1,24	13,96	14,72	0,76	14,19	14,67	0,48	14,36	14,59	0,23
Octobre	6,02	8,36	2,34	7,06	7,56	0,50	7,60	7,83	0,23	8,13	8,19	0,06	8,22	8,22	0,00
Moyenne.	12,79	17,09	4,30	13,52	14,84	1,32	13,61	14,40	0,76	13,77	14,25	0,50	13,79	14,16	0,37

Les phrases ci-dessus ont trait à l'influence sur la température du sol de la couverture seule ; elles ne peuvent s'appliquer *de plano* à la couverture telle qu'elle se trouve dans la nature, parce qu'il y a à tenir compte des arbres. Mais dans ces conditions l'action sur l'échauffement du sol est la même, comme l'indiquent les chiffres suivants que j'ai obtenus[1] :

1887.	TEMPÉRATURE de l'air.	TEMPÉRATURE DU SOL à 25 centimètres de profondeur. Épicéas			VARIATIONS de la température. Épicéas		
		sans couverture.	avec couverture.	Sol nu.	sans couverture.	avec couverture.	Sol nu.
Avril	7,30	5,71	5,11	7,06	2,22	1,88	4,20
Mai.	9,88	9,82	9,83	11,22	2,72	1,87	4,42
Juin	15,95	15,14	14,69	18,22	1,92	1,45	4,93
Juillet.	19,73	18,70	18,32	22,05	1,88	1,42	4,32
Août	16,28	17,13	16,91	19,39	2,47	1,83	4,30
Septembre.	12,21	14,75	14,51	16,36	1,78	1,23	3,05
Moyenne	**13,38**	**13,57**	**13,26**	**15,75**	**2,17**	**1,61**	**4,15**

Donc, en moyenne, la couverture a provoqué une diminution dans la température du sol pendant l'été et dans l'amplitude des variations. La façon dont cette température est influencée par la couverture ressort encore plus nettement si l'on considère la marche de la température pendant que varient les circonstances extérieures. Voici les différences qu'on obtient :

DATES 1887.	TEMPÉRATURE de l'air.	LE SOL PLANTÉ en épicéas et garni de sa couverture était plus froid (—) ou plus chaud (+) que le même sol sans couverture de la quantité suivante.
—	—	—
11-15 avril . . .	5,19	— 0,48
16-20 — . . .	2,95	+ 0,14
21-25 — . . .	11,76	— 0,67

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVII, 1894, p. 154.

DATES 1887.	TEMPÉRATURE de l'air.	LE SOL PLANTÉ en épicéas et garni de sa couverture était plus froid (—) ou plus chaud (+) que le même sol sans couverture de la quantité suivante.
—	—	—
6-10 mai. . . .	10,47	— 0,15
11-15 —. . . .	6,77	+ 0,46
16-20 —. . . .	9,70	+ 0,10
21-25 —. . . .	6,04	+ 0,29
26-31 —. . . .	11,62	— 0,18
6-10 août . . .	29,33	— 0,56
11-15 — . . .	15,66	— 0,28
16-20 — . . .	13,81	+ 0,17
21-25 — . . .	12,53	+ 0,34
26-31 — . . .	18,67	— 0,84

Le sol avec couverture était donc plus froid pendant l'ascension de la température que le même sol sans couverture ; il gardait au contraire mieux sa chaleur dans les périodes de refroidissement. On doit conclure de ces observations comme des précédentes que *la couverture diminue les extrêmes de température dans le sol et d'autant plus qu'elle est plus épaisse.*

Quant à l'influence de la couverture sur l'humidité du sol non garni de végétation, elle se manifeste par une augmentation sensible de cette humidité, ainsi que le montrent les chiffres suivants [1] :

Taux moyen d'humidité du sol pendant le semestre d'été.

1883.					1884.				
NOMBRE des dosages.	SOL NU.	SOL AVEC COUVERTURE de 5 centimètres formée de feuilles			NOMBRE des dosages.	SOL NU.	SOL AVEC COUVERTURE de 5 centimètres		
		de chêne.	de hêtre.	d'épicéa.			de mousse.	de feuilles de hêtre.	d'aiguilles d'épicéa
12	20,24	26,51	27,13	27,57	17	16,59	19,57	27,27	28,22

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. XIII, 1890, p. 171.

ANNÉES.	NOMBRE des dosages.	SOL NU.	FEUILLES de chêne. 2cm,5.	FEUILLES de hêtre. 2cm,5.	AIGUILLES d'épicéa 2cm,5.	AIGUILLES de pin sylvestre. 2cm,5.	MOUSSE. 2cm,5.	MOUSSE. 5cm.	MOUSSE. 7cm,5.	MOUSSE. 10cm.
1888.	13	16,66	20,29	20,08	19,57	20,41	20,45	20,92	21,43	21,40
1889.	23	17,99	19,22	19,71	19,40	20,16	20,51	20,75	21,10	21,54

Il est clair, d'après ces chiffres, que :

1° *Un sol avec couverture est notablement plus humide en été qu'un sol nu de même composition ;*

2° *Que le taux d'eau d'un sol garni d'une couverture s'accroît avec l'épaisseur de celle-ci, mais pas à proportion.*

Cette influence de la couverture tient surtout à ce qu'elle atténue l'influence directe sur le sol des facteurs de l'évaporation ; le vent et l'insolation, entre autres, ne peuvent plus exercer directement leur action desséchante et le peuvent d'autant moins que la couverture est plus épaisse. Dans ces matières d'origine organique qui recouvrent le sol, est emprisonnée une couche d'air saturée d'humidité et plus ou moins stagnante qui diminue aussi l'évaporation du sol. Les résultats ci-dessous accusent la diminution d'évaporation due à la couverture.

Eau évaporée (en centimètres cubes) par 1000 centimètres carrés de surface.

	MOUSSE.					FEUILLES. de chêne.		de hêtre.		d'épicéa.		de pin sylvestre.		SOL nu.
	15cm.	10cm.	7cm,5.	5cm.	2cm,5.	1cm.	2cm,5.	1cm.	2cm,5.	1cm.	2cm,5.	1cm.	2cm,5.	
En 20 jours de juillet et août 1888	40	80	160	200	470	780	360	930	480	510	270	550	270	2 030
En 22 jours de juillet et août 1889	160	250	»	410	730	1 080	630	1 160	630	670	440	590	370	2 020

On voit que le sol garni de couverture évapore notablement moins d'eau que le sol nu et la diminution due à la couverture est d'autant plus forte que celle-ci est plus épaisse.

On devrait pouvoir conclure de ce qui précède que le taux d'hu-

midité du sol couvert s'accroît considérablement avec l'épaisseur de la couverture. Cela n'est vrai pourtant que dans des limites restreintes, puisque les chiffres des essais précédents montrent avec la plus grande netteté qu'une couverture de $2^{cm},5$ d'épaisseur suffit pour maintenir dans le sol sous-jacent un taux d'eau élevé et que son humidité n'est pas sensiblement augmentée par une plus forte épaisseur de couverture. $2^{cm},5$ suffisent à atténuer assez l'évaporation pour que le sol reste dans un état voisin de la saturation. Si la couverture dépasse ces limites, le taux d'eau du sol n'augmente pas, bien que l'évaporation continue à diminuer, parce que le sol reste saturé et que l'eau en excès s'infiltre, ou que la couverture retient une quantité d'eau qui croît avec son épaisseur. Pour éclaircir ce point, il faut tout d'abord examiner l'influence de la couverture sur les quantités d'eau qui s'infiltrent dans le sol. Les recherches que j'ai faites[1] avec des lysimètres ont donné les résultats suivants :

Quantités d'eau d'infiltration en millimètres.

DATES	PLUIE en millimètres	SOL nu.	MOUSSE (Dicranum) vivante.	MOUSSE (Dicranum) morte. 5cm.	MOUSSE (Hypnum) morte. 5cm.	AIGUILLES d'épicéa. 5cm.	AIGUILLES de pin sylvestre. 5cm.	FEUILLES de chêne. 5cm.	FEUILLES de hêtre. 2cm.	FEUILLES de hêtre. 5cm.	FEUILLES de hêtre. 10cm.
10 avril-30 sept. 1882 .	604,71	271,37	222,72	475,05	458,91	490,66	477,08	508,95	488,55	508,64	514,75
6 avril-30 sept. 1883 .	651,74	335,25	301,85	456,89	410,41	528,66	490,10	537,04	491,41	523,30	520,18
Moyenne. .	628,23	303,21	262,29	465,97	434,66	509,66	483,59	522,99	489,98	515,97	517,47

DATES	PLUIE en millimètres	SOL nu.	AIGUILLES d'épicéa. 1cm.	AIGUILLES d'épicéa. 2cm,5.	AIGUILLES de pin sylvestre. 1cm.	AIGUILLES de pin sylvestre. 2cm,5.	FEUILLES de chêne. 1cm.	FEUILLES de chêne. 2cm,5.	FEUILLES de hêtre. 1cm.	FEUILLES de hêtre. 2cm,5.	MOUSSE MORTE (Hypnum). 2cm,5.	MOUSSE MORTE (Hypnum). 5cm.	MOUSSE MORTE (Hypnum). 7cm,5.	MOUSSE MORTE (Hypnum). 10cm.
1er avril-31 nov. 1888 .	897,5	461,8	723,5	756,8	655,1	676,8	704,1	830	680	705,5	629,1	651,4	669,1	661,9

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. XIII, 1890, p. 176.

Les chiffres ci-dessus montrent immédiatement que :

1° *Pour une même quantité de pluie pendant la saison de végétation, il y a dans un sol nu sensiblement moins d'eau s'infiltrant dans la profondeur, que dans ce même sol garni d'une couverture ;*

2° *Une couverture d'un centimètre suffit déjà pour augmenter à un degré extraordinaire la quantité de l'eau d'infiltration ; cette quantité a une faible tendance à s'accroître avec l'épaisseur de la couverture jusqu'à une certaine limite (environ 5 centimètres), au delà de laquelle elle reste constante, malgré l'épaisseur croissante de la couverture, ou elle subit une diminution continue ;*

3° *La quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol est sensiblement plus diminuée par une couverture de mousse vivante que par de la mousse morte de même espèce.*

Le résultat indiqué sous le numéro 1 doit être attribué à la diminution de l'évaporation du sol par la couverture et au maintien de son humidité, qui en est la conséquence. Puisque le sol couvert garde un plus fort taux d'eau que le sol nu, les quantités nécessaires pour remplacer la perte par évaporation sont naturellement plus faibles dans le premier cas que dans le second, d'où il résulte qu'il s'y accuse un excès d'eau de drainage plus tôt et en plus grande quantité que dans le sol nu.

Du reste, pour l'explication des résultats de ces essais, il n'y a qu'à se reporter à la manière dont la couverture se comporte vis-à-vis de l'eau (p. 412). Comme, à épaisseur égale, les quantités d'eau évaporée et infiltrée sont sensiblement les mêmes pour les couvertures de feuillus et de résineux, et comme l'évaporation est plus forte avec la mousse et l'eau qui s'en égoutte plus faible que pour les matières précédentes, *les quantités d'eau qui s'égouttent d'un sol sous une couverture de feuillus ou de résineux sont plus grandes que sous une couverture de mousse.*

Les influences de couvertures d'épaisseur variable sur la circulation de l'eau du sol sont beaucoup plus difficiles à expliquer que les précédentes, parce qu'entre ces relations et celles de la couverture vis-à-vis de l'eau il y a parfois des anomalies.

D'après les résultats des essais rapportés plus haut (p. 414), la quantité d'eau d'infiltration *sortant de la couverture* s'augmente avec

son épaisseur jusqu'à 20 centimètres. On devrait donc conclure de là qu'aussi l'eau de drainage *sortant du sol* recouvert d'une couche d'épaisseur variable doit être d'autant plus abondante que cette épaisseur est plus grande, jusqu'à cette même limite, le sol étant saturé d'eau avec une couverture de 5 centimètres de hauteur et se maintenant à cet état avec de faibles variations, comme on l'a montré. Ce n'est point le cas cependant ; car, d'après les résultats concordants d'expériences précédemment rapportées, les chiffres relatifs à l'eau qui s'égoutte du sol garni d'une couverture ayant plus de 5 centimètres (jusqu'à 10 centimètres) sont si peu différents, qu'ils peuvent être considérés comme égaux. Cette circonstance et aussi ce fait que l'augmentation de l'eau d'infiltration provenant du sol avec une épaisseur de couverture de 1 à 5 centimètres se fait dans une bien plus faible mesure qu'on ne devrait s'y attendre d'après les essais sur l'évaporation et l'infiltration relatives à la couverture même, rendent vraisemblable que les rapports de la couverture avec l'humidité sont partiellement modifiés par le sol sous-jacent. Cette modification consiste en ce que de plus fortes doses d'humidité sont retenues par la couverture quand elle repose sur un sol que quand il n'y a pas de sol.

On comprend la possibilité de cette modification si l'on réfléchit que le sol saturé oppose un obstacle mécanique à l'infiltration de l'eau de la couverture et que son passage de la couverture meuble dans le sol compact est ainsi rendu plus difficile, tandis qu'il n'y a pas d'obstacle quand la couverture repose directement sur le sol percé de trous du lysimètre.

Sous le bénéfice de ces observations, les résultats des précédentes expériences peuvent être résumés ainsi :

1° *L'humidité et par suite l'eau de drainage augmentent faiblement avec l'épaisseur de la couverture jusqu'à ce qu'elle atteigne environ 5 centimètres, parce que l'évaporation du sol est diminuée dans la même mesure et que cette diminution est supérieure à la quantité d'eau retenue par la couverture ;*

2° *A partir de cette limite jusqu'à 10 centimètres, les chiffres relatifs à l'humidité du sol et à l'eau de drainage restent sensiblement égaux, parce que l'évaporation de la couverture et sa faculté d'imbibition se compensent ;*

3° *Au delà de 10 centimètres, l'eau de drainage diminue constamment, parce que l'évaporation du sol est fort diminuée, mais les quantités d'eau retenues par la couverture même deviennent si grandes, que le sol couvert retient une quantité d'eau constamment décroissante à mesure qu'augmente la couverture.*

Le résultat signalé sous le numéro 3 peut s'expliquer seulement par ce fait que la couverture de mousse vivante a lancé plus d'eau dans l'atmosphère que la mousse morte. En comparant les chiffres obtenus, on voit qu'il y a de très notables différences. Ce résultat est en contradiction flagrante avec ceux de F. Oltmann [1] sur le mouvement de l'eau dans les mousses et son influence sur la distribution de l'eau dans le sol ; d'après lui, il y aurait concordance parfaite entre la mousse morte et la mousse vivante sous le rapport de l'évaporation et de son influence sur le taux d'humidité du sol. Il faudra de nouvelles recherches pour éclaircir ces contradictions.

Ces diverses influences de la couverture sur l'humidité du sol et les eaux de drainage se manifestent-elles de la même façon en forêt ? Mes essais [2] montrent que dans ces conditions les lois générales précédentes subissent quelques modifications très importantes.

L'action de la couverture (couche de mousse morte de 10 centimètres) sur l'humidité d'un sol portant un peuplement serré d'épicéas [3] fut la suivante :

Taux d'eau moyen du sol pendant le semestre d'été jusqu'à 50 centimètres (en pour-cent du poids).

ANNÉES.	NOMBRE des dosages.	ÉPICÉAS sans couverture.	ÉPICÉAS avec couverture.
1887	24	13.25	15.14
1888	23	14.14	15.30
1889	23	15.71	16.66
1890	22	13.98	14.69
1891	25	14.76	15.04
Moyenne		**14.37**	**15.37**

1. *Inaugural Dissertation der Universität Strassburg.* 1884. Dans *Beiträge zur Biologie der Pflanzen,* par F. Cohn, vol. IV, fasc. 1.

2. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. XVII, 1894, p. 171.

3. La surface de chaque lot était de 2 mètres carrés. Le sol avait été d'abord soigneusement mélangé et avait été garni au printemps de 1886 d'épicéas de 5 ans plantés à égale distance dans les deux lots.

Le sol couvert a donc accusé un taux d'humidité plus élevé que le sol non couvert ; mais la différence est bien plus faible que dans les expériences en sol non planté, ce qui tient surtout à la différence de végétation des arbres suivant que le sol est muni ou non d'une couverture. Dans le premier cas, les végétaux forestiers se développent dans leurs organes aériens et souterrains plus puissamment que dans le sol non couvert, puisqu'ils trouvent plus d'humidité et plus de matières nutritives grâce à la décomposition de la couverture. Ce résultat se voit à l'œil nu déjà, mais je l'ai traduit en chiffres en pesant ces arbres abattus au printemps de 1892, âgés alors de onze ans, et en mesurant leur hauteur et leur circonférence. Voici les résultats obtenus pour 5 plants de onze ans.

	POIDS EN GRAMMES DES 5 PLANTS				
	à l'état frais.	séchés à l'air.			
		Tiges.	Branches.	Aiguilles.	Total.
	—	—	—	—	—
Épicéas sans couverture . .	18 350	3 690	3 820	3 100	10 610
Épicéas avec couverture . .	23 700	3 980	5 070	4 500	13 550

Donc, le poids des épicéas avec couverture a été plus fort que celui des épicéas sans couverture de **29.2** p. 100 à l'état frais et de **27.7** p. 100 à l'état sec.

La hauteur des tiges était en moyenne de $1^{m},52$ pour les épicéas sans couverture et de $1^{m},55$ pour ceux avec couverture.

La circonférence, mesurée au quart, à moitié et aux trois quarts de la hauteur, a été trouvée de :

	AU QUART.	AU MILIEU.	AUX TROIS quarts.	MOYENNE.
	—	—	—	—
Épicéas sans couverture . . .	14,12	9,96	6,68	**10,25**
Épicéas avec couverture . . .	14,92	11,10	7,74	**11,25**

La couverture, on le voit par tous ces chiffres, a favorisé la croissance des épicéas et surtout celle des organes de transpiration dont le poids a été de **45.2** p. 100 plus fort que chez les épicéas sans couverture.

En résumé, l'influence de la couverture sur l'humidité du sol en forêt est diminuée par ce motif que la présence de cette couverture favorise la végétation et par suite l'absorption de l'eau du sol. C'est ce que montrent les essais précédents où l'on voit, dans les périodes

de forte évaporation, le taux d'eau du sol garni d'une couverture descendre au-dessous de celui du sol qui n'en a pas et l'influence de cette couverture diminuer d'année en année. Le sol des épicéas avec sa couverture fut plus humide que le sol sans couverture :

De 14,26 p.100 en 1887
De 8,24 — 1888
De 6,05 — 1889
De 5,08 p.100 en 1890
De 1,89 — 1891

Cette décroissance continue de l'influence de la couverture sur l'humidité s'explique très simplement par la végétation plus vigoureuse des épicéas et l'augmentation corrélative de leur transpiration ; ce qui amène à croire que, dans les périodes ultérieures de végétation des arbres, elle est probablement nulle, puis s'exerce en sens contraire à mesure qu'ils croissent plus activement grâce aux matières nutritives qui leur sont apportées par la décomposition de la couverture et les eaux d'infiltration.

L'essai fait sur le sol garni d'épicéas a donné ce résultat frappant au premier coup d'œil que l'eau de drainage n'est pas augmentée par la couverture, comme on devait s'y attendre d'après les résultats obtenus sur des sols non plantés, mais qu'elle est au contraire diminuée. Voici les chiffres moyens obtenus par saison dans une période de six ans (1887-1893) :

SAISONS (météorologiques).	PLUIE en millimètres.	EAU D'INFILTRATION en millimètres.		RAPPORTÉE A 100 DE PLUIE.		
		Épicéas sans couverture.	Épicéas avec couverture.	Pluie.	Épicéas sans couverture.	Épicéas avec couverture.
Printemps	185,07	50,52	46,06	100	35.4	24.9
Été.	402,48	11,52	8,86	100	2.9	2.2
Automne.	270,42	23,06	19,98	100	8.5	7.4
Hiver.	127,22	39,64	33,09	100	31.2	22.1
Somme ou Moyenne .	985,19	124,74	107,99	100	12.7	11.»

Ces chiffres montrent que *la présence d'une couverture diminue, dans un sol planté d'arbres, la quantité d'eau d'infiltration*. Cela est dû, avons-nous dit, à la plus grande activité de la végétation et de

la transpiration. En effet, la lame d'eau annuelle a atteint, pour la moyenne des six années 1887-1893, 990^{mm},6, dont **860**^{mm},**8**, soit **86.9** p. 100, ont été évaporés par les épicéas sans couverture et **877**^{mm},**7**, soit **88.6** p. 100 par les épicéas avec couverture.

Il y a sans doute encore d'autres influences secondaires, notamment celle-ci : l'absorption complète des petites pluies par la couverture et l'obstacle mécanique qu'oppose à la circulation de l'eau le système de racines relativement plus développé sous l'influence de la couverture. (Voir *Note II.*)

L'*importance de la couverture pour la fertilité du sol forestier* s'explique, d'après ce qui précède, par ces deux faits que les principes nutritifs qu'elle contient, rendus assimilables par sa décomposition, servent à nourrir les arbres et qu'elle exerce en outre toute une série d'actions favorables sur la texture, la température et l'humidité du sol forestier. L'action fertilisante apparaît surtout quand les circonstances extérieures favorisent l'érémacausis des détritus forestiers ; par contre, si la décomposition est anormale, s'il se forme de l'humus acide surtout en sol siliceux, la fertilité se trouve gravement compromise, tant par la dissolution intense des matières nutritives dans les zones superficielles que par la formation d'une couche d'alios résultant de l'agrégation des grains de sable par des matières humiques et arrêtant la croissance des plantes par l'obstacle qu'elle oppose à la pénétration des racines. Le maintien d'une certaine perméabilité dans le sol forestier est lié à la formation du terreau, tandis que le sol se durcit dès que les matières organiques se transforment en humus brut. Sur la température la couverture influe avantageusement en diminuant les extrêmes. Son action sur l'humidité se fait sentir en la maintenant dans le sol par la diminution de l'évaporation, mais en diminuant aussi la quantité d'eau du sol lorsque la végétation des arbres s'accélère grâce aux matières nutritives apportées par la couverture. La couverture peut exercer une influence nuisible, se traduisant par un fort appauvrissement du sol en eau dans le cas où son épaisseur s'exagère démesurément, si bien qu'elle absorbe la plus grande partie des précipitations atmosphériques et que presque toute sa masse subit la transformation tourbeuse.

TROISIÈME PARTIE

INTERVENTION DE L'HOMME DANS LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Appuyés sur les faits précédents, nous allons pouvoir établir les règles à l'aide desquelles on obtiendra, dans la pratique agricole, le meilleur mode de décomposition des matières organiques. Pour atteindre ce but, il faut d'abord déterminer quels sont les points de vue généraux à envisager pour arriver à une utilisation aussi parfaite que possible des principes nutritifs contenus dans les détritus organiques.

CHAPITRE I

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les faits exposés dans la première partie de ce travail montrent nettement que les deux processus les plus importants pour l'agriculture et la sylviculture, l'érémacausis et la putréfaction, diffèrent profondément dans leurs causes comme dans leurs résultats et ne peuvent donc être identifiés ainsi qu'il arrive très souvent. Tant que l'oxygène a libre accès dans les matières organiques, la décomposition se fait surtout par oxydation (érémacausis) ; ce sont au contraire des réductions qui se manifestent (putréfaction) quand l'air n'arrive plus ou n'a qu'un accès très limité. Comme la production de matières assimilables (et en tout cas non nuisibles) aux dépens des restes organiques en voie de décomposition ne se fait que par l'érémacausis, tandis que la putréfaction ne donne le plus souvent naissance qu'à des composés peu ou pas assimilables (voire nuisibles) et à des pertes d'azote (à l'état d'azote libre), il faut d'abord poser en principe que *l'on ne peut en pratique agricole utiliser parfaitement les éléments nutritifs contenus dans les matières organiques et empêcher la formation de composés nuisibles que par des mesures favorables à l'érémacausis de ces matières et s'opposant à la putréfaction.*

En outre, le praticien devra s'efforcer de réduire au minimum toutes les pertes d'aliments, qu'elles soient produites par la volatilisation d'éléments précieux ou par la dissolution de principes nutritifs facilement solubles provenant de la décomposition des détritus organiques.

Dans l'érémacausis des matières azotées, il se forme de l'ammoniaque qui peut se volatiliser facilement. Il s'en perdra plus si ces matières se décomposent vite et dégagent en peu de temps de grandes

quantités d'ammoniaque volatile, comme il arrive pour certains composés azotés de l'urine de nos animaux domestiques qui se transforment très vite en carbonate d'ammoniaque gazeux, soit directement (urée), soit indirectement, c'est-à-dire après transformation préalable en d'autres composés (acide hippurique). Empêcher cette évaporation d'ammoniaque est un des principaux buts qu'on doit se proposer dans la fabrication des fumiers.

Quand la décomposition se fait par érémacausis, il n'y a pas à se préoccuper du dégagement d'azote libre ; car tous les essais où on l'a constaté se sont faits dans les conditions non de l'érémacausis, mais de la putréfaction.

En ce cas, de nombreux essais l'ont montré, il se dégage de l'azote libre ; mais peu nous importe, puisque ce mode de décomposition doit être évité dans les opérations agricoles qui ont pour but de régulariser les processus de décomposition.

La dissolution des principes nutritifs, surtout des nitrates qui ne sont pas retenus par le sol, est généralement si intense que, dans une exploitation rationnelle, il faut y accorder la plus grande attention. Les pertes subies chaque année de cette façon par le sol en un des principes les plus précieux sont si importantes, d'après les recherches de J. B. Lawes et J. H. Gilbert [1] et de P. P. Dehérain [2], qu'il faut les empêcher par tous les moyens possibles ; c'est un devoir strict pour l'agriculteur.

Les nitrates se forment surtout dans les couches superficielles du sol, parce que là se trouvent le plus d'éléments azotés et les conditions les plus favorables à la nitrification (air, présence d'organismes nitrifiants en plus grande abondance, etc.). Plus la température est élevée (dans certaines limites, jusqu'à 37°), plus la nitrification est intense, à condition que le sol soit humide. Dans un sol sec il n'y a point de nitrification, pas plus que dans un sol mouilleux, où au contraire les nitrates se réduisent et dégagent de l'azote libre. C'est dans des con-

1. J. B. Lawes et J. H. Gilbert, *Journ. of the royal agric. Soc. of England*, vol. XVII, part. I et II ; vol. XVIII, part. III et IV.

2. P. P. Dehérain, *Annales agronomiques*, t. XVI, p. 337 ; t. XVII, p. 49 ; t. XVIII, p. 273 ; t. XIX, p. 65 ; t. XX, p. 21 ; t. XX, p. 449 ; t. XXI, p. 193.

ditions moyennes d'humidité que la nitrification se fait le plus énergiquement.

Sous l'action des pluies les nitrates se dissolvent (surtout le nitrate de chaux) et, comme ils ne sont pas retenus par le sol, ils sont entraînés dans les profondeurs et apparaissent en plus ou moins grande quantité dans les eaux de drainage.

D'après les recherches de J.-B. Lawes et J.-H. Gilbert la perte annuelle en azote nitrique par les eaux de drainage dans un sol nu (lehm compact avec sous-sol d'argile sableuse) fut par hectare pour une période de quatre ans avec une épaisseur de sol de :

49cm	98cm	147cm
51kg,0	40kg,7	48kg,1

ou, en moyenne, 46kg,6. Au prix de 1 fr. 60 c. le kilogramme d'azote, la perte s'élève à *75 fr. 70 c. par hectare.*

Tant que le sol *nu* reste assez également humide, la chaleur influe tellement sur la nitrification, qu'en été les quantités d'azote dissoutes sont plus fortes que dans les autres saisons, bien que le volume de l'eau de drainage soit fort diminué. La formation des nitrates est très activée par la chaleur ; aussi est-ce généralement de juillet à octobre que les eaux de drainage sont le plus riches en nitrates ; c'est d'avril à juin qu'elles sont le plus pauvres, du moins sous le climat de l'Angleterre. Mais ce n'est pas toujours le cas ; il faut que la chaleur puisse faire sentir son plein effet, c'est-à-dire que le sol soit humide et perméable.

Étant donné que dans le sol nu, en jachère, la quantité des eaux de drainage varie comme celle des pluies[1], il ne faut pas s'étonner que l'abondance des précipitations ait tant d'influence sur les pertes du sol en azote. Plus le volume des pluies et par suite des eaux de drainage est considérable, plus intense est, en général, la dissolution des nitrates et inversement. Ceci est vrai des années entières comme des saisons.

Les quelques résultats ci-dessous obtenus par Lawes et Gilbert

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XI, 1888, p. 59.

montrent nettement la relation qui existe entre les pertes en nitrates et la hauteur des pluies.

ANNÉE du 1er octobre au 30 septembre.	SUR 49 CENTIMÈTRES de profondeur.		SUR 98 CENTIMÈTRES de profondeur.		SUR 147 CENTIMÈTRES de profondeur.	
	Eau de drainage.	Perte d'azote par hectare.	Eau de drainage.	Perte d'azote. par hectare.	Eau de drainage.	Perte d'azote par hectare.
—	—	—	—	—	—	—
	centim.	kilogr.	centim.	kilogr.	centim.	kilogr.
1879-1880.	23,87	**44,6**	25,27	**30,7**	22,91	**31,5**
1877-1878.	35,75	**49,2**	40,68	**43,6**	38,67	**50,9**
1878-1879.	65,49	**69,8**	65,92	**54,1**	61,71	**70,9**

Les quantités d'azote extraites d'un sol nu varient comme les quantités d'eaux de drainage, qui sont en rapport à leur tour avec les quantités de pluie.

La perte d'azote dans le sol nu dépend de la répartition moyenne et saisonnière des précipitations. Dans les climats où dominent les pluies d'été (Europe moyenne), c'est en été que le sol laisse écouler le plus d'eau ; c'est en automne pour les climats où dominent les pluies d'automne (Angleterre).

La dissolution des nitrates est en rapport avec ces faits; elle atteint son maximum dans les saisons indiquées quand se présentent en même temps les conditions les plus favorables à une nitrification énergique. Pendant la période froide où les eaux d'infiltration sont moins abondantes et les oxydations moins intenses, la quantité d'azote perdue est moindre ; dans les régions où l'hiver est rigoureux (Allemagne), il s'infiltre peu d'eau à cette saison et déjà beaucoup au printemps, tandis que dans les climats doux (Angleterre) c'est l'inverse et c'est au printemps que l'infiltration atteint son minimum. Ces différences s'expliquent simplement par ce fait que dans les climats doux le sol gèle rarement l'hiver et la neige fond facilement, tandis que, dans les climats rudes, le sol gelé l'hiver ne laisse rien passer ; ce n'est qu'au printemps qu'il dégèle et laisse s'infiltrer les eaux de la fonte des neiges[1].

Le sol garni de plantes agricoles présente avec le sol nu des différences très importantes tant sous le rapport de la grandeur de la déperdition d'azote provenant de la dissolution des nitrates que de

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XI, 1888, p. 59.

l'époque à laquelle elle se fait. Dans les terres cultivées, à condition qu'elles ne soient pas fumées avec des sels ammoniacaux ou des nitrates, la quantité de nitrates perdue est incomparablement plus faible que dans le sol en jachère. D'après LAWES et GILBERT, la perte d'azote dans des champs cultivés en blé a été, pour une moyenne de trente ans, de $4^{kg},56$ à $5^{kg},44$ par hectare, donc bien moindre que dans le sol nu. Cette différence tient, d'une part, à ce que les plantes assimilent les nitrates du sol et aussi à ce que, pendant la saison de végétation, c'est-à-dire pendant la saison *chaude*, elles absorbent tant d'eau que la portion qui s'infiltre est extrêmement réduite.

Aussitôt après la récolte les nitrates apparaissent dans l'eau de drainage et sont enlevés en assez grande quantité en dehors de la saison de végétation.

La déperdition d'azote dans les champs cultivés est considérable, les recherches de LAWES et GILBERT le montrent, quand les plantes ont une végétation languissante par défaut d'aliments ; cette perte diminue dès que par des engrais appropriés on favorise la croissance des végétaux. Du reste l'intensité de dissolution des nitrates dépend et de l'aptitude des plantes à s'approprier les nitrates du sol et de leur durée de végétation. C'est dans les cas où, comme dans les prairies permanentes, le sol est constamment couvert de végétation, que la plus grande proportion de nitrates sera utilisée par les végétaux et qu'il en disparaîtra le moins dans les eaux de drainage. Pour les autres cultures, la déperdition d'azote est d'autant plus grande que la période de végétation est plus courte.

Les expériences de P. P. DEHÉRAIN font pénétrer encore plus avant dans ces questions ; non seulement elles confirment les résultats de LAWES et GILBERT, mais elles les complètent sur bien des points importants. Celles des deux années 1893-1894 et 1894-1895 sont surtout intéressantes parce qu'en raison des différences climatériques la végétation des plantes et l'arrivée des eaux de drainage ont présenté des différences considérables.

Du mois de mars au mois de mars de l'année suivante, les conditions climatériques des deux années différèrent d'abord en ce que la hauteur des pluies de 1893-1894 fut plus grande ($490^{mm},7$) que celle de 1894-1895 ($419^{mm},8$). Leur répartition même présenta des diver-

gences sensibles ; d'avril à juin 1893 il tomba 62^{mm},5 et 126^{mm},5 en 1894. Aussi les récoltes furent-elles beaucoup plus belles cette année-là que la précédente. De juillet à septembre les pluies de 1894 (194^{mm},6) ont été aussi plus favorables aux betteraves que celles de 1893 (169^{mm},7). Les pluies d'hiver ont été au contraire plus abondantes en 1893, 258^{mm},7, contre 98^{mm},7 en 1894.

Tandis que, par suite de la sécheresse du printemps et de la faible quantité de pluie en été, les drains ne donnèrent pas d'eau en 1893 du 2 mars au 9 octobre, même dans la parcelle nue, il y eut en 1894 un assez fort écoulement d'eau souterraine. Nul au printemps, il ne se produisit qu'au commencement d'août, quand les pluies de juillet eurent saturé le sol et il se continua en septembre. L'hiver sec qui suivit occasionna une très faible infiltration.

La quantité d'eau de drainage fut très petite en 1894 dans les sols cultivés à cause de la vigoureuse végétation des plantes. Elles absorbèrent presque toute l'eau tombée en été, si bien qu'après la récolte le sol ne possédait qu'un faible taux d'humidité. Pour ce motif et parce que les précipitations furent peu abondantes en automne et en hiver, il ne s'écoula que peu d'eau dans la saison froide. En 1893 l'infiltration fut importante à partir d'octobre. Le tableau suivant fournit des indications sur les récoltes, sur l'eau de drainage et sur les nitrates qu'elle a entraînés :

CULTURES	1893-1894			1894-1895		
	Poids de la récolte (1893).	Eau de drainage en millimètres.	Azote dans l'eau de drainage en kilogr. par hectare.	Poids de la récolte (1894).	Eau de drainage en millimètres.	Azote dans l'eau de drainage en kilogr. par hectare.
Jachère nue (moyenne de 4 essais) . . .	»	107,3	101,8	»	76,1	76,5
Blé (moyenne de 3 essais).	Grain : 14qm,8 Paille : 26qm,5	72,0	49,7	Grain : 23qm,0 Paille : 97qm,50	1,2	0,08
Avoine et trèfle (moyenne de 3 essais). .	Grain : 13qm,8 Paille : 37qm,5	60,5	22,9	Grain : 40qm,6 Paille : 93qm,1	3,6	0,35
Betterave à sucre (moyenne de 3 essais) .	23,833 kg	49,2	23,1	38 333 kg	2,5	0,11
Betterave pour semence (moyenne de 3 essais).	Grain : 1,760kg	68,6	31,8	Grain : 1 533kg	3,1	0,51
Pomme de terre (moyenne de 3 essais). .	28,833 kg	67,9	30,6	»	»	»
Ray-grass (1 essai)	4,500 kg	75,2	36,9	5 625 kg	9,5	0,95

Il résulte de ces chiffres avec la dernière évidence que l'évacuation de l'eau souterraine et la dissolution de nitrates qui lui est corrélative sont très importantes dans les sols nus en comparaison des pertes subies dans les mêmes conditions par les sols cultivés et que, d'autre part, le poids de la récolte, autrement dit le degré de développement de la plante et les circonstances climatériques règlent le phénomène. Dans l'année 1893-1894, la quantité d'eau de drainage et de nitrate dissous fut très grande, parce que la sécheresse calamiteuse du printemps entrava la croissance des plantes qui ne donnèrent que de faibles récoltes et qu'après la saison de végétation il tomba de grandes pluies. Dans l'année 1894-1895, les plantes végétèrent très vigoureusement, grâce à la répartition convenable des pluies pendant la période de croissance, et purent ainsi extraire du sol beaucoup d'eau, ce qui réduisit à presque rien le volume de l'eau de drainage et la dissolution des nitrates dans les parcelles plantées ; en outre, l'apport par les eaux atmosphériques dans la période qui suivit la récolte fut relativement faible et insuffisant pour saturer le sol préalablement desséché par la végétation, si bien que l'eau ne put s'infiltrer abondamment en cette saison.

La vigueur de végétation étant, avec l'abondance des pluies, d'importance capitale pour la quantité des eaux de drainage et pour les pertes d'azote qu'elles provoquent, la fumure doit jouer aussi un rôle dans la question quand elle accélère la croissance des plantes. Quelques essais de A. Petermann [1] montrent qu'il en est ainsi en effet. Il remplit d'une même terre des vases de $1^m,20$ de profondeur et 1 mètre carré de surface, les garnit de betteraves à sucre, puis mesura et analysa l'eau de drainage. De ces quatre vases I ne reçut pas d'engrais, II reçut des engrais minéraux, III de l'azote (nitrate de soude), IV des engrais minéraux et de l'azote (nitrate de soude). Le tableau suivant indique les récoltes (racines et feuilles) et le volume d'eau de drainage obtenus dans les diverses années.

1. A. Petermann, *Bulletin de la Station agronomique de l'État à Gembloux*, n° 45, 1889.

ANNÉES.	HAUTEUR de pluie en millimètres.	I.		II.		III.		IV.	
		Récolte en kilogr.	Eau de drainage en millimètres.	Récolte en kilogr.	Eau de drainage en millimètres.	Récolte en kilogr.	Eau de drainage en millimètres.	Récolte en kilogr.	Eau de drainage en millimètres.
1882 .	547	3,850	156	4,575	116	5,540	108	7,180	80
1881 .	483	2,600	111	3,260	80	4,215	65	5,180	50
1886 .	404	3,200	54	4,440	47	5,400	36	5,940	25
1884 .	384	2,460	40	3,880	21	5,120	20	5,880	12

Plus les pluies sont abondantes et les récoltes faibles, plus est grand le volume de l'eau de drainage et inversement.

La perte d'azote par dissolution des nitrates a été, par hectare, en kilogrammes de :

	I ET II sans azote.	III ET IV avec azote.
1882.	14,8	11,9
1881.	13,6	10,9
1886.	6,6	4,4
1884.	3,0	2,1

Malgré l'addition d'azote, la quantité de nitrate exportée a été plus faible que dans les vases sans azote, ce qui s'explique par une plus forte production de matière végétale qui a entraîné une plus grande absorption d'azote et d'eau. Ces résultats montrent en outre que les doses d'azote extraites par l'eau de drainage varient dans le même sens que les pluies.

Il n'arrive pas toujours, comme l'ont prouvé aussi bien les recherches de LAWES et GILBERT que celles de DEHÉRAIN et de PETERMANN, que la fumure diminue la dissolution des nitrates. LAWES et GILBERT ont trouvé que la déperdition des nitrates dans l'eau de drainage croît avec la quantité de sels ammoniacaux ajoutés au sol et d'une manière très sensible ; mais ces résultats ne peuvent s'appliquer *de plano* à la grande pratique, parce qu'on a employé des doses massives d'engrais. L'autre fait mis en lumière par ces expériences est important : les fumures minérales qui activent

le développement des végétaux diminuent la dissolution des nitrates.

Dans les essais de Dehérain où l'azote fut ajouté sous forme de nitrate de soude, la perte d'azote fut considérable, comparée à celle des parcelles qui n'avaient rien reçu ou seulement du fumier de ferme. Comme Lawes et Gilbert, Dehérain a trouvé ce fait important dans la pratique que l'azote du fumier ou des engrais organiques est beaucoup moins facilement exporté que celui des sels ammoniacaux ou du nitrate de soude, évidemment parce que, dans le premier cas, l'azote ne devient assimilable que peu à peu, au fur et à mesure de la décomposition.

Signalons aussi les résultats d'une expérience faite par A. Petermann avec des lupins mis dans des vases qui avaient été conditionnés comme il suit : I. Sol (sable) non fumé ; II. Fumure minérale ; III. Même fumure avec microbes ; IV. Même fumure avec nitrate de soude ; V. Même fumure avec sulfate d'ammoniaque ; VI. Fumure minérale et sang en poudre. L'azote ajouté s'élevait à 27gr,6 dans les vases IV-VI ; le sol primitif en contenait 6gr,5786. Voici les résultats qui nous intéressent dans cette expérience :

	Récolte totale (organes aériens et souterrains). Substance sèche. — grammes.	Eau de drainage. — millimètres.	Azote dans la récolte. — grammes.	Azote dans l'eau de drainage. — grammes.
I . . .	68,4	281,64	0,8952	0,2290
II . . .	236,5	237,85	4,8453	0,1764
III . . .	223,5	238,53	4,6509	0,2280
IV . . .	445,0	190,88	8,0459	19,0254
V . . .	447,8	184,75	8,0416	12,8697
VI . . .	809,0	145,05	10,0044	4,5196

Ici encore la quantité d'eau de drainage s'est montrée inversement proportionnelle au poids de la récolte, mais pas aux quantités d'azote drainées. Ceci ne se présenta que sur les parcelles fumées uniquement avec des engrais minéraux ; celles qui avaient reçu du nitrate de soude et du sulfate d'ammoniaque accusèrent au contraire une forte dissolution de nitrate (et partiellement aussi d'ammoniaque pour le n° V), parce qu'une partie seulement de l'azote de ces en-

grais fut utilisée par les plantes et que l'autre passa aisément dans l'eau de drainage, vu la grande perméabilité du sol. La perte fut très importante ; elle atteignit 190 kilogr. d'azote par hectare pour le nitrate de soude et 129 kilogr. pour le sulfate d'ammoniaque. Dans les expériences de LAWES et GILBERT la déperdition dans des champs de blé fumés à raison de 96^{kg},4 d'azote (en sels ammoniacaux) s'éleva pour une moyenne de trente ans à 34^{kg},7 quand on ajoutait une très forte fumure minérale et à 48^{kg},4 avec les sels ammoniacaux seuls. Les essais de PETERMANN montrent de nouveau que l'adjonction d'azote sous forme organique (sang en poudre) entraîne une bien moindre déperdition de nitrate que sous forme de sels solubles[1] riches en azote comme le nitrate de soude et le sulfate d'ammoniaque.

Tous ces faits, importants pour la pratique à divers points de vue, peuvent se résumer ainsi :

1° *Les champs cultivés éprouvent chaque année, par lixiviation des nitrates, lesquels ne sont pas absorbés par le sol, des pertes d'azote plus ou moins grandes, qui peuvent aller jusqu'à 120 kilogr. d'azote par hectare et plus ;*

2° *Cette déperdition par les eaux de drainage est d'autant plus forte que le sol reste plus longtemps en jachère et que les précipitations atmosphériques sont plus abondantes et inversement ;*

3° *Sur les sols garnis de végétaux l'entraînement des nitrates dans la profondeur décroît d'autant plus que les plantes se sont plus développées grâce à des conditions climatériques favorables, à une fumure appropriée ou à une culture rationnelle et que leur durée de végétation est plus longue et inversement ;*

4° *Le danger d'une forte déperdition par cette voie est d'autant plus à craindre que les conditions sont plus favorables à la nitrification, que la perméabilité du sol est plus grande et que les végétaux ont moins besoin des quantités d'azote contenues dans les fumiers ;*

---

1. Le faible pouvoir absorbant du sol employé (sable quartzeux) explique que, dans les essais de Petermann, une partie des sels ammoniacaux énergiquement fixés par le sol d'ordinaire a été entraînée.

5° *Les nitrates provenant des engrais azotés sont d'autant moins entraînés que la végétation est plus luxuriante soit par elle-même soit par l'addition d'engrais minéraux ;*

6° *En employant des engrais d'origine organique, les pertes de nitrates sont bien moindres qu'en apportant l'azote sous forme de sels solubles (nitrate de soude et sulfate d'ammoniaque).*

Avec ces règles on peut, comme on va le montrer par la suite, raisonner les moyens de limiter avec succès les pertes en l'un des principes les plus précieux des sols arables.

CHAPITRE II

COMMENT ON INFLUE SUR LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES EN MODIFIANT LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU SOL

1. — Travail mécanique du sol.

On a déjà démontré dans une autre occasion que la décomposition des matières organiques sur les divers sols se fait très différemment suivant leur état physique. Dans les sols à grain fin, tant qu'ils ne subissent pas de modifications appropriées, c'est la putréfaction qui domine, tandis que dans les sols à gros grain c'est en général l'érémacausis. Cette différence tient à ce que les premiers, à cause de l'extraordinaire finesse de leurs pores et de leur saturation par les précipitations atmosphériques ne laissent pas pénétrer l'air en assez grande quantité pour qu'ils provoquent d'énergiques oxydations. Il s'ensuit que les détritus enfouis dans le sol ou les engrais organiques qu'on lui incorpore sont soumis à la putréfaction, c'est-à-dire à ce processus par lequel le passage à l'état assimilable des matières nutritives contenues dans ces matières se fait d'une manière très imparfaite, par lequel aussi, sans parler de la formation de principes nuisibles aux plantes (acides humiques, sulfate de fer, etc.) se réalisent des pertes d'azote par réduction des nitrates et dégagement final d'azote gazeux. Les sols à gros grain, au contraire, jouissent, à cause de l'active circulation de l'air dans leur masse, d'une composition telle, que la destruction de toutes les matières qui s'y trouvent suit un cours normal (l'érémacausis), à condition qu'ils aient l'humidité nécessaire. Ces sols ont le plus souvent une constitution défectueuse sous ce rapport. Avec une humidité suffisante, l'érémacausis y est si rapide que les matières nutritives qui s'y forment ne sont pas

suffisamment fixées par le sol, pas complètement absorbées par les plantes, si bien qu'elles sont lessivées plus ou moins, d'autant mieux que, dans ces sols si perméables, l'infiltration est d'ordinaire très abondante.

Remarquons aussi que, dans le terrain laissé à lui-même et se tassant de plus en plus, l'air nécessaire au cours normal de l'érémacausis se raréfie à mesure que les couches sont plus profondes. Non seulement la décomposition subit un ralentissement proportionnel, mais elle se modifie d'une façon désavantageuse pour la formation des principes nutritifs assimilables et d'autant plus que l'air a moins libre accès.

On arrive pour le point considéré à cette conclusion qu'*aux opérations mécaniques agricoles incombe la tâche de retourner d'abord le sol, d'amener à la surface les couches profondes, de rendre perméables à l'air les sols à éléments fins et de mettre les autres en état de conserver le plus possible de l'eau qu'ils reçoivent*. Les moyens les plus divers s'offrent au praticien pour atteindre ce but.

Le travail à la charrue a tout d'abord pour but de mettre la plus grande surface possible des couches profondes en contact avec l'atmosphère ; il faut donc pour cela *retourner* la couche arable, travail auquel est seul apte l'instrument en question ; il s'agit en outre d'*ameublir* le sol, ce qui est d'autant plus difficile que le sol est plus compact, tant à cause des obstacles que les instruments ont à vaincre que du choix des moyens à employer pour amener la structure normale ; il faut, avant de se décider, examiner soigneusement tous les facteurs qui peuvent avoir de l'influence. C'est pour cela que la question de savoir comment et jusqu'à quel degré la couche arable doit être travaillée dans ces sols compacts pour que la décomposition des matières organiques suive son cours normal doit fixer d'abord l'attention.

Sous le rapport de la texture, les sols présentent des différences importantes suivant que leurs molécules, isolées comme dans une poudre, sont simplement juxtaposées ou bien qu'elles se réunissent en agrégats plus ou moins volumineux (grumeaux, mottes), laissant entre eux d'assez grands vides qui amènent diverses modifications très

tranchées dans l'état physique du sol. Comme, dans le premier cas où les molécules sont incohérentes, la grandeur des vides interstitiels servant à la circulation de l'air et de l'eau dépend surtout de la grosseur et de la forme des molécules, on désigne cette sorte d'agencement des éléments du sol sous le nom de *texture pulvérulente.*

Dans le second cas où la réunion en grumeaux ou agrégats a tant d'influence sur la constitution mécanique du sol, on se sert du mot : *texture grumeleuse.* La formation des grumeaux ne se fait guère que dans les sols compacts et riches en humus. Dans les sols sablonneux ou à gros grains les agrégats qui se forment parfois se détruisent très vite[1].

La formation de grumeaux, telle qu'on l'observe dans les terres bien travaillées, modifie profondément les rapports du sol avec l'air, l'eau et la chaleur, comme il résulte de l'essai suivant fait avec des sols à l'état pulvérulent et à l'état grumeleux.

Il y a d'abord une notable différence entre ces deux groupes de sols au point de vue du taux d'air occlus. Exprimé en pour-cent du volume, il est dans un sol de lehm[2] :

	SÉCHÉ A L'AIR.	AVEC SA FACULTÉ D'IMBIBITION		
		minima.	moyenne.	maxima.
	—	—	—	—
Texture pulvérulente . . .	52.99	13.27	8.71	0.61
Texture grumeleuse . . .	55.76	25.88	22.12	14.22

Le sol à l'état pulvérulent contient donc moins d'air que le même sol à l'état grumeleux et la différence croît avec le taux d'eau. Cela tient surtout à ce que par l'addition d'eau dans le sol pulvérulent les pores se remplissent d'eau, tandis que dans le sol grumeleux les vides entre les agrégats sont plus grands et restent remplis d'air. Après des pluies abondantes un sol désagrégé en ses plus fines molécules peut se saturer d'eau à un point tel que sa capacité pour l'air tombe à zéro.

1. E. W. Hilgard, *Forschungen*, *etc.*, vol. II, 1879, p. 441.
2. E. Wollny, *Forschungen*, *etc.*, vol. VIII, 1885, p. 369.

La texture influe extrêmement sur la perméabilité du sol; *avec une texture grumeleuse il est beaucoup plus perméable à l'air qu'à l'état pulvérulent*. Les chiffres suivants le montrent[1].

SOL SÉCHÉ A L'AIR.	QUANTITÉ D'AIR FOURNIE PAR HEURE EN LITRES.				
Pression de l'air en millimètres d'eau . .	20.	40.	60.	80.	100.
Épaisseur de la tranche de sol : 25 centimètres.					
Lehm en poudre ($0^{mm},0$-$0^{mm},25$) . . .	2,04	3,38	4,72	6,06	7,40
Lehm en grumeaux ($0^{mm},5$-$4^{mm},00$) . .	139,2	270,1	385,6	473,3	549,8
Épaisseur de la tranche de sol : 50 centimètres.					
Lehm en poudre ($0^{mm},0$-$0^{mm},25$). . . .	2,00	3,33	4,67	6,00	7,33
Lehm en grumeaux ($0^{mm},5$-$4^{mm},00$) . .	69,6	139,2	208,8	263,8	324,4

Les différences de perméabilité exprimées par ces chiffres existent aussi quand le sol est humide et par la raison déjà donnée. A l'état pulvérulent, le sol peut être amené à une imperméabilité complète quand il est saturé, comme il arrive par les grandes pluies.

Pour l'eau comme pour l'air, une modification importante est apportée au sol par sa mise en grumeaux.

Quant à la circulation de l'eau dans le sol de bas en haut (ascension capillaire) comme de haut en bas, le lehm a présenté, dans quelques-uns de mes essais, les différences suivantes, selon qu'il était employé en poudre ou en grumeaux.

L'eau monta par capillarité jusqu'à une hauteur de :

	APRÈS				
	1 jour.	5 jours.	10 jours.	20 jours.	29 jours.
	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
Lehm en poudre ($0^{mm},0$-$0^{mm},25$)	25,1	62,2	72,9	88,3	100,0
Lehm en grumeaux ($0^{mm},5$-9 millim.) . .	22,0	42,2	51,3	61,4	67,5

1. E. WOLLNY, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 212.

L'eau s'enfonça jusqu'à la profondeur de :

	APRÈS			
	4 heures.	22 heures.	47 heures.	59 heures.
	centim.	centim.	centim.	centim.
Lehm en poudre ($0^{mm},0$-$0^{mm},25$)	23,4	56,1	87,2	97,6
Lehm en grumeaux ($0^{mm},5$-9 millim.) . .	24,1	100,8	»	»

On voit par là que *l'eau monte plus vite et plus haut dans le sol pulvérulent que dans le sol en grumeaux et que dans ce dernier l'eau s'enfonce plus vite.* Ces différences tiennent à ce que dans les sols grumeleux les interstices sont trop larges pour que la force capillaire puisse s'exercer. L'eau monte donc uniquement par les pores que contiennent les grumeaux eux-mêmes. Tandis que, dans le sol pulvérulent où tous les vides sont capillaires, l'ascension se fait par le plus court chemin, ce processus est lent dans le sol en grumeaux, l'eau ne circulant que d'un grumeau à l'autre, donc avec des interruptions continuelles et après force détours. Cet obstacle à l'ascension de l'eau, obstacle d'autant plus grand que les vides non capillaires sont eux-mêmes plus grands, fait que l'eau ne peut monter ni si vite ni si haut que dans les sols pulvérulents. *Les vides non capillaires retardent le mouvement ascensionnel de l'eau.*

Parmi les autres propriétés qui ont trait à l'humidité du sol, il faut aussi considérer la faculté d'imbibition qui s'exprime par la quantité d'eau retenue dans l'unité de volume du sol. Les expériences que j'ai faites à ce sujet[1] m'ont donné les résultats suivants :

	FACULTÉ d'imbibition absolue.
	vol. p. 100.
Lehm en poudre ($0^{mm},0$-$0^{mm},25$).	42.91
Lehm en grumeaux ($0^{mm},5$-$9^{mm},0$)	31.93

La faculté d'imbibition du sol est sensiblement plus faible dans le sol grumeleux que dans le sol pulvérulent, parce que dans le premier les vides non capillaires restent remplis d'air après l'humectation ; dans le second presque tous les pores exercent l'action capillaire

1. E. WOLLNY, *Forschungen*, *etc.*, vol. VIII, 1885, p. 198.

et se remplissent d'eau. Quant à l'influence de la texture sur l'évaporation, on peut dire que *le sol pulvérulent évapore plus d'eau que le sol en grumeaux.*

Les chiffres suivants empruntés aux expériences de C. Eser[1] le montrent.

LEHM.	EAU ÉVAPORÉE (en grammes) par 1 000 centim. carrés de surface. — Texture	
	pulvérulente.	grumeleuse.
—	—	—
Du 17 août au 1er septembre 1883 . .	4 033	3 124

Cette différence s'explique facilement par des différences dans la circulation capillaire et dans la faculté d'imbibition. Comme le sol pulvérulent est plus humide et l'ascension de l'eau plus rapide, la perte par évaporation superficielle y est plus vite réparée que dans le sol grumeleux mions humide et dans lequel les espaces non capillaires entravent la montée de l'eau. Cette dernière circonstance fait aussi que, dans les sécheresses, la surface du sol en grumeaux est bien plus facilement desséchée que celle du sol en poudre et qu'il y a moins d'eau perdue dans le premier par évaporation, l'influence des facteurs qui la régissent étant fortement diminuée par la couche desséchée de la surface[2].

J'ai cherché[3] par diverses expériences à déterminer quelle est sur l'humidité du sol l'influence globale, c'est-à-dire telle qu'elle s'exerce dans les conditions naturelles, des facteurs que nous venons de décrire. Pendant la saison d'été, le taux d'eau moyen du sol fut pour le

LEHM.	TEXTURE	
	pulvérulente.	grumeleuse.
—	—	—
	vol. p. 100.	vol. p. 100.
1882	38.80	23.39
1883	32.66	20.53
Taux relatif.	100	61.20

1. C. Eser, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 66.
2. C. Eser, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 43.
3. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 395.

L'humidité du sol a donc diminué de plus d'un tiers par la mise en grumeaux.

Les quantités d'eau perdues par le drainage et par l'évaporation sont inscrites ci-dessous :

SAISON d'été.	PLUIE en millimètres.	Texture. pulvérulente.	Texture. grumeleuse.	TAUX RELATIF — Texture pulvérulente.	TAUX RELATIF — Texture grumeleuse.
Eau de drainage en millimètres.					
1882 .	505,2	134,9	238,7	100	177,03
1883 .	638,1	185,6	264,3	100	142,38
		Moyenne		100	159,70
Eau évaporée en millimètres.					
1882 .	505,2	313,9	251.0	100	79,88
1883 .	638,1	417,6	346,5	100	82,90
		Moyenne		100	81,39

D'après ces chiffres la mise du sol en grumeaux a eu pour résultat d'augmenter de moitié le volume de l'eau de drainage et de diminuer l'évaporation d'environ un cinquième.

Dans la marche de l'humectation il est à remarquer que les variations du taux d'eau sont plus grandes dans le sol pulvérulent que dans le sol grumeleux. Cela tient à ce que le premier sol, en raison de la lente infiltration de l'eau, s'imbibe plus lors des grandes pluies et évapore plus par la sécheresse à cause de sa meilleure capillarité que le second plus perméable, mais où l'ascension capillaire est ralentie. *Par la mise en grumeaux du sol on obvie donc aussi bien à un excès nuisible d'eau dans les périodes humides qu'à un manque d'eau dans les périodes sèches.* Enfin les conditions thermiques des sols de texture diverse ont encore leur importance dans la décomposition des matières organiques. J'ai montré[1] que le sol grumeleux s'échauffe plus et se refroidit plus que le sol pulvérulent et présente par suite de plus grandes variations de température. *En*

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. V, 1882, p. 191.

moyenne, le sol grumeleux est plus chaud, comme il résulte des chiffres ci-après :

	Température du sol à 10 centimètres de profondeur. — Texture — pulvérulente. —	grumeleuse. —
Du 30 août au 6 septembre 1879	18,91	19,72
Différence	0,81	
Variations de température	9,22	10,19
Du 5 au 8 juillet 1881.	21,45	22,45
Différence	1,0	
Variations de température.	8,80	9,13

Dans le sol grumeleux la capacité calorifique est plus faible, la conductibilité calorifique plus grande et la perte de chaleur due à l'évaporation est moindre qu'avec l'état pulvérulent.

Toutes ces différences vis-à-vis de l'air, de la chaleur et de l'eau amènent à la conviction que c'est dans le sol grumeleux seul que se fera la décomposition normale répondant au but que l'on vise. Quand le sol est à l'état pulvérulent, l'accès de l'air est limité et même arrêté par les temps humides où il y a saturation et dès lors la décomposition se fait suivant le mode *anaérobie,* par *putréfaction.*

Dans le sol en grumeaux au contraire, l'air ayant libre accès et l'humectation du sol restant sensiblement égale dans les variations climatériques, il se manifeste une oxydation énergique qui décompose les matières organiques suivant le mode *aérobie,* par *érémacausis.* Comme celle-ci tend à rendre assimilables les principes nutritifs contenus dans les détritus, il en résulte que, *dans tous les sols peu perméables et enclins à se saturer, il faut se préoccuper avant tout de rétablir la texture grumeleuse et d'éviter que le sol ne prenne l'état pulvérulent.*

Il n'est pas toujours facile d'amener le sol à la texture normale ; indiquons brièvement les règles dont la stricte observation conduit au but en employant la charrue seule.

Proclamons d'abord qu'*il est non seulement utile, mais absolument*

indispensable de labourer aussitôt après l'enlèvement des récoltes. Cette opération est nécessaire, car la perméabilité que possède le sol après la récolte se perd plus ou moins vite par les précipitations atmosphériques, dès qu'a disparu le couvert protecteur des végétaux (p. 404). Le sol se tasse de plus en plus, il devient d'autant plus difficile à labourer et à mettre en grumeaux que le labour est plus tardif.

Une seconde règle à suivre est de *faire le premier labour seulement quand le sol a un certain degré d'humidité*, si l'on n'a pas l'intention de le laisser en sillon brut pendant l'hiver. Il résulte avec évidence des recherches de H. PUCHNER[1] que le sol, même le plus compact, peut être transformé en une masse grumeleuse quand il a un taux moyen d'humidité (environ 40 p. 100 de sa faculté d'imbibition). On doit ou labourer les terres quand elles sont *en bon état*, comme on dit, ou ne pas les toucher si l'on ne veut détériorer leur état physique pour plusieurs années ; car, si elles sont trop humides ou trop sèches, elles ne se mettent pas en grumeaux ; dans le premier cas, la terre colle, comme du mastic, au soc de la charrue, la surface du sillon est graisseuse ; dans le second, on ne retourne que des mottes dures qui, sous l'action de brise-mottes et de rouleaux, se brisent en une masse de petits fragments durs, mais jamais en une couche arable de texture normale. C'est pourquoi toute précipitation comme tout retard dans les labours entraîne les plus grands préjudices, et l'observation d'un laps de temps déterminé pour ces travaux est de la plus haute importance. D'après ce que l'on vient de dire, il est facile d'établir le degré d'humidité le plus convenable pour lequel le sol se laisse travailler le plus aisément ; chaque cultivateur devrait le connaître exactement pour tous ses champs. Si on ne veut se livrer à cette recherche, il faut s'aider d'autres moyens moins sûrs. Ainsi quand le sol, essayé à la bêche, se met en grumeaux, qu'il ne colle pas à l'instrument, que la terre retournée n'a pas la surface polie et brillante, qu'elle montre de nombreuse fentes et saillies ou qu'une motte malaxée dans la main ne s'agglutine plus, mais se brise en fragments, cela prouve en général que le sol est assez desséché pour que la charrue puisse commencer avantageusement son œuvre.

1. H. PUCHNER, *Forschungen, etc.*, vol. XII, 1889, p. 239.

On doit aussi apporter la plus grande attention à ce que les sillons, lors du premier labour, soient aussi étroits que possible (10-12 centimètres). C'est seulement dans ces conditions que l'on arrive, autant qu'on le peut avec la charrue, à faire foisonner convenablement le sol. En outre, au lieu de la charrue qui est peu propre à ameublir la terre, on se servira utilement pour l'ameublissement et le mélange de la houe à cheval ou de l'extirpateur.

Laisser le sol après un labour brut exposé à la gelée pendant l'hiver est aussi un moyen de lui donner son degré normal de porosité, parce que les particules sont énergiquement séparées quand l'eau qui les imprègne se distend par la gelée.

Au printemps, les sols de lehm et d'argile se montrent dans un excellent état de culture, tel qu'il pourrait être à peine obtenu par l'emploi le plus soigné de la charrue ou de l'extirpateur.

L'action de la gelée nous fournit le moyen le plus simple de mettre en grumeaux les sols qui exigent beaucoup d'efforts et tout praticien devrait labourer dès l'automne les champs destinés aux cultures d'été. Dans ce cas, on peut labourer même quand la terre est détrempée, parce que l'excès d'eau disparaîtra bientôt par suite des changements mécaniques du sol sous l'influence du gel et du dégel. Pour les manipulations des terres au printemps, il faut observer quelques précautions si l'on veut qu'elles gardent leur bonne texture. On doit notamment laisser le sol, une fois dégelé et émietté par la gelée, atteindre aussi dans ce cas son taux d'humidité convenable avant d'y mettre la charrue et on doit le travailler ensuite aussi peu que possible, parce qu'il pourrait facilement se résoudre en une masse pulvérulente à cause de la trop grande friabilité des grumeaux. Le plus souvent une seule culture suffit au printemps et il est préférable d'employer l'extirpateur.

Dans les sols compacts les règles énoncées ont pour but de favoriser la pénétration de l'air dans le sol et de le préparer à emmagasiner de fortes provisions d'eau ; mais, pour les raisons déjà mentionnées, elles ne s'appliquent pas aux sols légers, peu aptes à la mise en grumeaux. Il sera au contraire indiqué d'employer des moyens propres à diminuer l'accès de l'air dans ces sols et à retenir leur faible provision d'eau. En outre des opérations dont il est parlé plus

loin, ce résultat peut être obtenu en évitant les labours répétés si usités dans la pratique et l'abandon du sol en sillons bruts qui favorisent le desséchement et exagèrent la porosité à un degré excessif. Des labours fréquents sont parfaitement inutiles dans de tels sols, parce qu'ils possèdent dès le début le degré de porosité nécessaire pour la décomposition normale des matières organiques ; une seule culture à la charrue est suffisante. Assez souvent même on pourra l'éviter et obtenir avec l'extirpateur la texture désirable.

Outre le retournement et l'ameublissement dus à la charrue et à l'extirpateur il y aurait à examiner aussi l'influence que le *hersage*, le *houage* et le *raclage* du sol exercent sur les agents de la décomposition des matières organiques. Les recherches que j'ai faites à ce sujet[1] ont montré que *l'ameublissement superficiel diminue l'évaporation de la couche arable et augmente par suite son taux d'humidité*. Les opérations susnommées favorisent l'évaporation des parties exposées à la lumière et amènent la formation d'une croûte sèche qui s'oppose à l'évaporation, parce que les gros vides non capillaires qui la parsèment ralentissent beaucoup l'ascension capillaire de l'eau à la surface.

C'est dans les sols garnis de végétation que l'influence de l'opération se fait le mieux sentir par l'ameublissement de la couche superficielle, comme il arrive, par exemple, quand on déchaume les prés, les trèfles et les luzernes, ou quand on passe la houe entre les lignes des récoltes pour enlever les mauvaises herbes. Dans ce cas, en effet, on détruit en même temps la couverture vivante qui dessèche tant le sol, et de ses débris il se forme une couverture morte qui atténue sensiblement l'évaporation.

Le hersage s'emploie avantageusement dans le but d'aplanir et d'émietter le sol ; il faut l'entreprendre surtout lorsqu'on a à craindre, dans les terres labourées, une dessiccation nuisible (sols légers) ou un durcissement (sols compacts) quand la sécheresse se met sur pied. Dans le premier cas, la surface évaporante est diminuée ; dans le second, on détruit mécaniquement les mottes, c'est-à-dire qu'on provoque la mise en grumeaux ; on ne l'obtiendra du reste que si le sol qu'on herse est suffisamment humide.

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. III, 1880, p. 535.

Le *roulage* influe sur la décomposition des matières organiques *en diminuant la capacité du sol pour l'air et sa perméabilité proportionnellement à la pression exercée*[1]. Son action sur la chaleur du sol se manifeste, d'après mes observations[2], en ce que le sol roulé est en moyenne plus chaud que le sol non roulé pendant la saison chaude ; le volume de l'air, mauvais conducteur, occlus entre les éléments, est diminué et la conductibilité du sol est ainsi augmentée. En ce qui concerne l'humidité[3], *le sol roulé évapore plus que le sol non roulé*. Cela tient à ce que les grumeaux du sol se rapprochent par la pression, si bien qu'une partie des vides non capillaires qui s'opposaient à l'ascension de l'eau deviennent capillaires et l'eau peut monter plus facilement[4].

Du fait que le roulage augmente l'évaporation du sol on a souvent conclu que dans toutes les circonstances cette opération diminue le taux d'eau du sol. *Ce n'est pourtant le cas que s'il ne pleut pas après le roulage. S'il est au contraire suivi de précipitations abondantes, le sol roulé devient plus humide que le sol non roulé.* Dans le sol ameubli la pluie pénètre facilement et elle est vite entraînée dans les profondeurs par les vides non capillaires, tandis qu'elle s'écoule lentement dans le sol roulé et reste plus longtemps dans la couche arable. Donc la faculté d'imbibition du sol est augmentée[5] par le roulage et sa perméabilité pour l'eau est diminuée[6]. La plus forte teneur en eau du sol roulé persiste si la sécheresse survient après la pluie, parce que la supériorité d'évaporation du sol roulé ne suffit généralement pas pour égaliser les taux d'eau[7].

En se fondant sur les règles précédentes et sur les exigences auxquelles doit satisfaire, en vue des matières organiques, le traitement des sols arables de composition physique variée, il devient clair que le roulage se justifie sur tous les sols légers de faible faculté d'imbi-

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VIII, 1885, p. 369 ; vol. XVI, 1893, p. 215.
2. *Id.*, vol. V, 1882, p. 1.
3. C. Eser, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 68.
4. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VII, 1884, p. 291.
5. *Id.*, vol. VIII, 1885, p. 199.
6. *Id.*, vol. V, 1882, p. 31.
7. *Id.*, vol. V, 1882, p. 17.

bition et de grande perméabilité pour l'air et pour l'eau et qu'au contraire cette opération est nuisible pour la décomposition des matières organiques sur tous les sols compacts, à moins qu'ils ne se trouvent dans un état d'ameublissement excessif, parce qu'elle diminue leur capacité pour l'air et provoque l'accumulation de grandes quantités d'eau.

Sur les sols fumés avec le fumier de ferme ou les engrais verts et possédant en même temps une texture très poreuse, le roulage régularise la décomposition des matières et obvie à la volatilisation et à la lixiviation des principes nutritifs. Cela se comprend si l'on considère que l'on diminue ainsi l'air occlus dans le sol et qu'il y a contact plus intime entre ce sol et les substances qui lui sont incorporées. La décomposition se fait alors non seulement plus régulièrement, mais plus lentement que dans le sol plus poreux. Le fait que le sol roulé est plus chaud que le sol non roulé ne modifie rien, parce que l'influence du volume d'air occlus l'emporte sur celle d'une température plus élevée. Par suite du contact plus intime entre le sol et les substances en décomposition, les principes nutritifs solubles et volatils qui en proviennent sont mieux absorbés par le sol dans les terres roulées et la dissolution des nitrates est plus empêchée que dans les terres plus meubles où l'on court le danger d'une volatilisation partielle de l'ammoniaque formée dans l'érémacausis et de l'entraînement des nitrates dans la profondeur, vu la perméabilité excessive du sol pour l'air et l'eau.

Le *défonçage* donne un moyen de favoriser puissamment la décomposition des matières organiques, non seulement dans les couches profondes du sol, mais même dans la zone superficielle. Par cette opération les couches profondes où l'absence d'air amène le processus par putréfaction et la formation de principes nuisibles à la végétation deviennent perméables ; il s'y fait dès lors de fortes oxydations, grâce auxquelles les matières organiques subissent l'érémacausis, et tous les produits nuisibles de réduction sont détruits.

La répartition plus égale de l'humidité du sol provoquée par le défonçage exerce en outre la plus heureuse influence sur ces réactions. Les précipitations atmosphériques peuvent humecter bien mieux le sol avec labour profond qu'avec labour superficiel ; car, dans ce

dernier cas, elles s'accumulent volontiers à la surface de la zone que la charrue n'a pas touchée, surtout dans les terres compactes, et provoquent ainsi un excès d'humidité. Ajoutons que le sol labouré profondément se maintient plus humide pendant la sécheresse, parce que les zones les plus humides sont situées plus bas, que la perte par évaporation superficielle est plus difficilement remplacée, et que la surface se dessèche plus vite que dans le sol avec labour superficiel[1]. Ainsi, le sol défoncé se maintient plus humide dans les périodes de forte évaporation, ne se sature pas autant par les grandes pluies et possède un taux d'humidité plus régulier que le sol superficiellement labouré. Ces influences, jointes à l'augmentation de perméabilité qui amène une meilleure décomposition des matières organiques et une augmentation corrélative dans les principes nutritifs assimilables, parlent en faveur du défoncement, surtout dans les terres imperméables.

Parmi les autres procédés employés dans le travail mécanique du sol, le *buttage* mérite spécialement l'attention. Le sol, dans les buttes, est plus perméable ; dans la saison chaude, il s'échauffe plus et est moins humide que le sol travaillé à plat[2] ; aussi la décomposition y est-elle plus intense pour toutes les terres compactes, gardant des excès d'eau. Il en résulte que sur de tels sols cette opération est incontestablement avantageuse pour les réactions dont il s'agit, et son emploi mérite d'être généralisé. Il n'y a pas à craindre ici de dessiccation nuisible du sol, parce qu'à cause de sa grande faculté d'imbibition il conserve généralement assez d'humidité provenant des pluies qui ont précédé la sécheresse, et la capillarité fait monter aisément des couches profondes une quantité d'eau suffisante. Dans toutes les terres qui se dessèchent facilement, au contraire, le buttage est nuisible, parce que le sol déjà sec, déjà très perméable, perd encore plus d'humidité, devient encore plus perméable, si bien que, par les temps secs, la décomposition marche trop lentement et par les temps humides trop rapidement.

Dans cet exposé des rapports des différents procédés pratiquement

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 8.
2. *Id.*, vol. III, 1880, p. 117.

employés pour la manipulation des terres avec l'activité des microbes du sol, il reste enfin à résumer l'influence exercée à ce point de vue par les diverses *méthodes de culture*. Dans la culture en ados, comme on l'a déjà vu (p. 210), la distribution de la chaleur est très irrégulière ; la pente nord est plus froide que la pente sud, les pentes est et ouest ayant un degré intermédiaire. Mêmes différences pour l'humidité dont les taux les plus faibles sont à l'exposition sud et les plus forts à l'exposition nord, les orientations est et ouest (dont la première est la plus sèche) se placent entre ces deux extrêmes. La conséquence de cette distribution différente des deux facteurs essentiels de la décomposition des matières organiques est que les réactions marchent d'un pas inégal suivant les diverses expositions, et influencent dans cette même mesure la fertilité du sol. Quand les pluies sont suffisantes, c'est du côté sud que la décomposition est la plus rapide, du côté nord qu'elle est la plus lente. Si le temps se maintient sec, ces rapports changent en partie ; à l'exposition sud, malgré la température élevée, les réactions sont entravées faute d'humidité et c'est à l'exposition nord, où la chaleur est la moins accusée cependant, que la décomposition se fait le mieux à cause du taux plus fort d'humidité. De pareilles différences se remarquent pour les versants est et ouest, ceux-ci se prêtant plus que ceux-là à une active transformation des détritus organiques. Dans le sol labouré à plat, la chaleur et l'eau sont également réparties ; la décomposition y marche partout du même pas, et les principes nutritifs qui passent à l'état assimilable sont partout en égale quantité. Pour ces raisons déjà, la culture à plat l'emporte sur la culture en ados. (Voir *Note J*).

2. — Jachère.

On se rend aisément compte de l'influence de la jachère sur les réactions chimiques du sol si l'on considère que le sol nu est, pendant la saison de végétation, sensiblement plus humide et plus chaud que le sol planté (p. 229) et que l'intensité de la décomposition varie avec la température et l'humidité. Une augmentation dans l'humidité, dans l'échauffement et aussi dans l'accès de l'air (si l'on ameublit en même temps le sol) doit donc favoriser la décomposition des

matières organiques qui sont contenues dans le sol nu ou qui lui sont artificiellement incorporées (matières humiques, résidus des récoltes, fumier de ferme, engrais verts, etc.). C'est en réalité ce qui arrive, comme on peut le déduire de ce fait que l'air occlus dans un sol en jachère possède un taux d'acide carbonique bien plus élevé que celui d'un même sol planté (p. 247). Cette différence considérable est la meilleure preuve de l'exactitude de l'hypothèse que nous venons de faire, car l'acide carbonique est un des produits finaux de l'érémacausis et son taux, toutes conditions égales d'ailleurs, peut servir de mesure à l'intensité de la décomposition.

S'il n'est pas douteux que celle-ci soit grandement favorisée par la jachère grâce à l'augmentation d'humidité et d'échauffement qu'elle amène dans le sol, il s'ensuit que le sol s'enrichit dans la même mesure, soit directement, soit indirectement, en principes nutritifs assimilables, directement parce que la décomposition des matières organiques fournit de l'ammoniaque et des composés minéraux solubles, indirectement parce que l'excès d'acide carbonique formé dissout les matières minérales insolubles et en fait passer une partie à l'état assimilable (p. 389).

Les conditions nécessaires à une puissante oxydation de l'ammoniaque formée dans l'érémacausis se trouvant réunies (humidité, température élevée), il se fait pendant la jachère une énergique nitrification, comme R. Warington l'a démontré (p. 248).

En somme, la jachère rend disponible une plus grande quantité de principes minéraux nutritifs, de nitrates et d'eau et, comme ils ne sont pas absorbés par une végétation, ils s'accumulent et augmentent la fertilité du sol. Ce n'est cependant pas toujours le cas ; le sol peut, dans certaines circonstances, subir du fait de la jachère des pertes d'aliments plus ou moins fortes.

Pour comprendre ceci, rappelons-nous que le sol en jachère fournit des quantités d'eau de drainage beaucoup plus grandes que le sol garni de végétation. En calculant mal le temps de la jachère, on inflige facilement au sol une perte en matières nutritives et surtout en nitrates, sels qui ne sont pas retenus ; cette perte sera d'autant plus sérieuse que le sol restera plus longtemps en jachère, que son pouvoir absorbant pour les principes nutritifs sera plus faible, que

sa perméabilité sera plus grande et que les pluies seront plus abondantes. Donc, pour raisonner scientifiquement l'emploi de la jachère, il faudra prendre en considération, en chaque lieu, les qualités physiques et chimiques du sol, le climat, la durée de la jachère, etc.

En tout cas, pendant une longue jachère (jachère pleine), durant toute une année, le sol perd une plus ou moins grande partie des matières nutritives solubles, surtout des nitrates, formées dans cette période, parce que le sol, même s'il était préalablement desséché, est complètement humecté au bout d'un certain temps et que les pluies qui surviennent alors amènent un écoulement d'eau de drainage d'autant plus abondant que l'apport atmosphérique et la perméabilité du sol sont plus grands.

Dans les courtes jachères, telles qu'il s'en présente pour toute culture entre l'époque de la récolte et celle du labour en vue de la récolte suivante, l'action sur la fertilité dépend et de l'état du sol après la récolte et de la durée de la jachère.

Quand la jachère succède à une récolte qui a profondément desséché le sol, en général on n'a pas à craindre la dissolution des nitrates si la culture pour la récolte suivante est faite à l'automne, parce que les précipitations atmosphériques servent exclusivement à humidifier à nouveau le sol et il ne s'écoule pas d'eau de drainage. Dans ces conditions, la jachère exerce au contraire une très heureuse influence sur la fertilité en constituant une réserve d'eau et d'aliments; elle semble commandée dans bien des cas, comme, par exemple, quand on sème du blé d'hiver après du trèfle. Le blé végéterait mal, si l'on voulait ne culbuter le trèfle qu'à l'automne pour semer aussitôt, parce que le sol desséché par le trèfle qui transpire à haute dose ne contiendrait que peu d'eau et que la décomposition des racines de trèfle serait peu avancée. Il sera au contraire avantageux de rompre le trèfle après la première coupe (jachère de la Saint-Jean) et de laisser le sol en jachère jusqu'au labour pour la semaille du blé; le sol aura ainsi le temps de s'imbiber à fond et d'accumuler des matières nutritives à l'état soluble qui se forment par la destruction déjà avancée des résidus de la récolte de trèfle. L'expérience montre suffisamment que cette pratique a la plus heu-

reuse influence sur la végétation du blé. Si, par contre, le sol au début de la jachère possède déjà une assez forte humidité ou s'il doit rester tout l'hiver jusqu'au printemps sans végétation, on ne peut éviter une perte plus ou moins grande, surtout si le temps est très humide et le sol très perméable. Ces sols perméables (sols sablonneux) possèdent d'ordinaire un faible pouvoir absorbant pour les principes nutritifs, si bien que la dissolution peut s'étendre non seulement aux nitrates, mais encore aux éléments minéraux. Dans les sols compacts et riches en humus, la jachère n'entraîne pas, si la terre est humide, de pertes aussi grandes que dans les sols légers, parce qu'ils ont un pouvoir absorbant beaucoup plus fort et une moindre perméabilité. Cependant on ne doit pas perdre de vue les dommages causés à la provision des principes nutritifs, et en premier lieu des nitrates, même sur ces sols, surtout s'ils passent tout l'hiver sans végétation. Lawes et Gilbert ont montré que, même sur les sols compacts, les pertes d'azote peuvent encore être importantes. A cet égard il y a plusieurs circonstances à envisager. Les nitrates qui se sont formés pendant l'été sont pour la plus grande partie retenus dans le sol jusqu'à l'hiver, attendu que la nitrification se fait presque exclusivement dans les couches superficielles et que l'émigration des nitrates dans le sous-sol exige un certain temps. C'est ce qui arrive aussi quand il survient un hiver sec. La récolte suivante trouve alors dans le sol une provision de nitrates équivalente à une forte fumure azotée. Mais si un hiver humide succède à l'été ou à l'automne pendant lequel le sol est resté en jachère, une grande partie des nitrates est perdue avec l'eau de drainage et la récolte profite peu de la jachère.

Pour empêcher ou diminuer les pertes, surtout en nitrates, il semble indiqué d'occuper la jachère avec des végétaux qui, à l'automne, seront enfouis à l'état vert. L'utilité de cette pratique résulte, d'une part, de ce que les nitrates existants dans le sol sont transformés en composés organiques, qui, pendant l'hiver, passent de nouveau à l'état assimilable, et, de l'autre, de ce que, pendant la végétation des cultures dérobées, la nitrification est atténuée par la diminution de l'humectation et de l'échauffement.

Dans la jachère pleine, comme dans le cas où les récoltes sont

faites à maturité, on doit recommander la culture des papilionacées (vesces, lupins, serradelle), qui enrichissent le sol à la fois en matières organiques et en matières azotées. Pour des jachères courtes, on choisit des plantes végétant aussi vite que possible comme, par exemple, la moutarde blanche ou la spergule. C'est la moutarde blanche (*Sinapis alba*) qui remplit le mieux le but, à cause de sa rapidité de végétation. Cette pratique recommandée sera d'application étroite si la jachère dure plus d'une année ou s'étend depuis l'été jusqu'au delà de l'hiver suivant, ou si le sol est saturé d'humidité au début de la jachère, s'il possède une grande perméabilité, et si l'on est sous un climat humide. Quand le sol a été fortement asséché par la récolte précédente et que la jachère ne dure que jusqu'à l'automne, la culture dérobée semble non seulement superflue, mais nuisible, parce qu'alors le but principal de la jachère, qui est l'accumulation de l'humidité dans le sol, ne serait pas atteint. (Voir *Note I.*)

3. — Drainage.

Dans les endroits mouilleux, les matières organiques sont, par suite de l'absence d'air, soumises à la putréfaction qui a pour conséquence l'accumulation d'humus acides et la formation de produits de désoxydation. L'expulsion par le drainage de l'eau en excès et l'arrivée d'air qui en est la suite auront d'abord pour effet de mettre un terme au mode de décomposition jusqu'alors en vigueur et de supprimer par l'oxydation divers composés nuisibles (sulfate de fer) ainsi que les phénomènes de dénitrification qui sont liés à un dégagement d'azote libre. Il ne faut pourtant pas s'attendre à une active érémacausis de ces matières organiques formées en l'absence d'air, parce qu'elles sont, comme on l'a vu (p. 166), très résistantes à l'action de l'oxygène. C'est seulement quand le sol, préalablement labouré, présente une grande surface à l'air, et que les humus acides sont détruits par le chaulage, que les matières organiques formées dans le sol (résidus des récoltes) ou incorporées artificiellement deviennent aptes à se décomposer.

Le drainage, à côté de l'aération qu'il procure, exerce une action favorable sur les conditions thermiques du sol, dont la température

moyenne s'accroît à mesure que le taux d'eau baisse (p. 223), ce qui favorise d'autant la décomposition.

Quant à l'humidité, qui joue un si grand rôle dans tous les processus organiques, elle est aussi modifiée favorablement par le drainage, mais seulement si cette opération est légitimée par les propriétés du sol. Dans beaucoup de terrains et à certains états, le drainage enlève tant d'eau que, pendant les périodes sèches, le desséchement du sol nuit à la décomposition des matières organiques et à la végétation des récoltes. On le comprend si l'on réfléchit que les procédés de drainage (fossés, tuyaux souterrains) enlèvent aux sols toute l'eau que ceux-ci ne peuvent retenir fixement, et que, par suite, ceux qui n'ont qu'une faible faculté d'imbibition (sols légers) ou qui évaporent beaucoup (tourbières, sols avec végétation permanente), ne gardent plus une réserve d'eau suffisante pour maintenir leur humidité pendant les longues sécheresses. Pour obvier à ces insuffisances qui se manifestent par une activité moindre dans la décomposition des matières organiques et, par suite, dans la croissance des plantes, il faut se préoccuper de fournir de l'humidité au sol pendant la période de forte évaporation (été).

Le procédé le plus simple dans le drainage à fossés ouverts consiste à installer des vannes d'arrêt dans les fossés ; on les ferme après l'écoulement des eaux du printemps, ou suivant les besoins ; le procédé le plus parfait dans le drainage souterrain consiste dans l'emploi de certains appareils de fermeture, qui permettent de régler parfaitement l'humidité du sol.

4. — Irrigation.

L'apport d'eau est important pour la décomposition dans le cas où le sol, par suite de certaines conditions climatériques, manque de l'humidité qu'exigent ces réactions. Ceci peut arriver soit par défaut de pluie, soit par excès d'évaporation dû à une haute température, à des vents desséchants, à un air trop sec. Suivant les circonstances, la limite de la quantité de pluie au-dessous de laquelle l'irrigation est utile à la végétation des plantes cultivées varie. Pour les régions où l'évaporation est forte, où la faculté d'imbibition du sol est faible,

on peut admettre que l'irrigation du sol est nécessaire quand la hauteur de pluie n'atteint pas 600 millimètres. Dans le cas contraire, une lame d'eau de 400 millimètres peut être indiquée comme une limite au-dessous de laquelle le sol ne contient plus assez d'eau pour une érémacausis intense et pour une végétation vigoureuse.

Quant à la manière de pratiquer cet arrosage, il faut surtout prendre garde de lessiver le sol et de le transformer en marécage. L'immersion empêche vite tout accès de l'air, ce qui donne lieu à la décomposition par putréfaction et convient moins en général que les procédés, tels que l'irrigation par rigoles qui laisse le sol accessible à l'air. En tout cas cette irrigation doit être conduite de façon qu'elle n'amène pas une forte quantité d'eau de drainage et que les pertes d'éléments nutritifs forcément liées à ces expulsions d'eau se réduisent au minimum.

L'oxygène contenu dans l'eau des rigoles oxyde le sol des prairies, puisque l'eau de drainage contient non seulement moins d'oxygène, mais aussi plus d'acide carbonique et d'acide sulfurique que l'eau des rigoles. C'est ce qui faisait dire à J. König [1], qui a récemment mis ce fait en évidence, que l'influence de l'irrigation pour les prairies était la même que celle du labour pour les champs. Cette interprétation est cependant exagérée, parce que les quantités d'oxygène contenues dans l'eau qui imbibe le sol sont infinitésimales comparées à celles qui circulent dans une couche arable ameublie. L'observation montre en effet que le sol des prairies irriguées s'enrichit en humus, moins, il est vrai, que celui des prairies non irriguées, mais beaucoup plus que celui des champs cultivés, et la composition de cet humus n'est pas telle qu'on puisse l'envisager comme le produit d'une énergique oxydation.

5. — Mélange avec d'autres sols.

Les propriétés du sol les plus importantes pour la décomposition des matières organiques peuvent, dans certains cas, être profondément modifiées par le mélange de ce sol avec d'autres qui se com-

---

1. J. König et C. Krauck. *Landwirthschaftliche Jahrbücher,* vol. XI, 1882, p. 203.

portent mieux ou autrement vis-à-vis de l'eau, de l'air et de la chaleur.

Les sables et les terres sablonneuses sont éminemment propres à l'amélioration des sols, argileux ou de ceux qui leur ressemblent. En les incorporant à l'argile on la rend plus poreuse, plus perméable ; son excessive faculté d'imbibition est en même temps diminuée ; elle devient plus chaude et plus facile à travailler. L'amélioration dans l'ameublissement se montre surtout lors des labours tardifs et s'accuse par la facilité plus grande avec laquelle l'argile se laisse mettre en grumeaux. L'humidité des sols compacts est nettement influencée par le mélange de sable, ainsi qu'il ressort des chiffres suivants [1] :

Taux d'eau moyen en pour-cent du volume.

PENDANT la saison d'été.	LEHM.	3/4 vol. lehm. 1/4 vol. sable.	1/2 vol. lehm. 1/2 vol. sable.	1/4 vol. lehm. 3/4 vol. sable.	SABLE.
1882 .	34,35	29,81	23,75	16,53	11,68
1884 .	34,23	28,73	22,96	16,56	12,34

Le taux d'eau du lehm diminue à mesure que le taux de sable augmente.

L'influence que le mélange avec le sable exerce sur les conditions thermiques du lehm se manifeste dans le tableau ci-après :

Température du sol à 15 centimètres de profondeur en juillet 1883.

SOL	1-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-31	MOYENNE
Lehm	21,58	22,36	21,24	14,94	15,82	15,37	**18,45**
3/4 vol. lehm + 1/4 vol. sable.	21,90	22,57	21,38	14,97	15,93	15,43	**18,59**
1/2 vol. lehm + 1/2 vol. sable.	22,94	23,13	21,44	15,10	16,15	15,66	**18,80**
1/4 vol. lehm + 3/4 vol. sable.	23,51	23,32	21,60	15,18	16,33	15,87	**19,20**
Sable	23,79	23,75	21,62	15,22	16,46	16,12	**19,38**

Ces chiffres établissent que, pendant la saison chaude, la température du lehm s'accroît à mesure qu'augmente son taux de sable.

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVIII, 1895, p. 33.

Le lehm et l'argile subissent, par leur mélange avec le sable, comme on le voit, des modifications relatives à l'air, à l'eau et à la chaleur qui favorisent la décomposition des matières organiques.

En fait, dans un sol ainsi amélioré, toutes les substances d'origine végétale et animale se décomposent bien plus vite.

Sur les sols sablonneux, légers, on emploie avec succès, pour améliorer leurs propriétés physiques, des terres argileuses à éléments fins (marnes) qui ont une plus forte faculté d'imbibition, un plus grand pouvoir absorbant pour les principes nutritifs et une plus faible aptitude à l'échauffement. Elles sont donc particulièrement aptes à augmenter la fertilité des sols sablonneux.

Dans les sols riches en humus et dans les sols humiques, le sable joue un rôle améliorant en diminuant leur faculté d'imbibition excessive et en augmentant leur aptitude à l'échauffement (p. 394 et 396). L'activité décomposante des sols humiques ainsi améliorés se trouve dès lors augmentée.

6. — Fumure.

La fumure par engrais d'origine organique influe sur la fertilité des sols en ce qu'une plus ou moins grande partie des principes nutritifs y est à un état non assimilable et passe peu à peu sous une forme assimilable par les progrès de la décomposition. *Ainsi se trouve diminué le danger de voir se perdre par dissolution les éléments précieux.*

L'utilisation des aliments qui y sont contenus dépend essentiellement du degré d'altération des matières et de leur mode d'emploi.

Pour le premier point il est à remarquer que sur les sols où la décomposition est lente et où l'eau d'infiltration est en même temps rare (sols compacts), les engrais organiques doivent, pour produire leur plein effet, être incorporés au sol à un degré de décomposition déjà avancé, c'est-à-dire à un état où ils contiennent une forte proportion de matières nutritives toutes formées. Au contraire, pour les sols où la décomposition est facile, où l'eau d'infiltration est

abondante, il sera avantageux d'employer les engrais en question à un état peu décomposé, afin d'obvier le plus pratiquement à une dissolution de principes nutritifs.

De même, quant à la quantité du fumier, à l'époque et à la profondeur de son enfouissement, il faut considérer l'état physique du sol pour donner aux plantes une nourriture suffisante tout en empêchant qu'elle se perde inutilement. En donnant aux terres sablonneuses, légères, de fortes doses de fumier de ferme, il se forme en peu de temps, grâce à une décomposition rapide, tant de matières nutritives, qu'elles peuvent se perdre par dissolution en plus ou moins grande proportion, vu le faible pouvoir absorbant de ces sols et l'abondance de leur eau de drainage.

D'après ces considérations, il semble indiqué : 1° de fumer les sols sablonneux non fortement et une seule fois, mais souvent et faiblement ; 2° d'apporter et d'enterrer le fumier peu de temps avant les semailles ; 3° de l'enfouir plus profondément que dans les autres sols. Ces règles doivent être d'autant plus strictement suivies que la décomposition du fumier est plus avancée. Sur les sols compacts qu laissent passer peu d'eau de drainage, où l'humification des matières organiques est lente, où, en général, le pouvoir absorbant est considérable, on observera les règles opposées.

Il faudra incorporer le fumier à plus forte dose, plus rarement et plus longtemps avant les semailles que sur les sols légers, prendre garde en outre de ne pas l'enfouir à plus de 8 à 12 centimètres ; c'est seulement dans ce cas que la décomposition progresse normalement. A plus grande profondeur, le manque d'air amènerait facilement la putréfaction et la formation sans profit d'un magma tourbeux qu'on retrouverait encore dans le sol après de longues années.

En laissant le fumier longtemps étendu sur le sol avant de l'enfouir, on peut exercer sur la décomposition des matières organiques que contient ce sol une action analogue à celle de la jachère. Par la diminution de l'évaporation, le sol est, sous la couverture de fumier, plus humide que sous le sol nu ; mais la chaleur y est moindre. L'action de cette couverture sur l'humification dépend surtout des conditions climatériques. En 1878, le sol garni d'une couverture de

paille m'a donné[1], en moyenne, moins d'acide carbonique que le sol nu, tandis qu'en 1884 j'ai obtenu un résultat contraire. Le taux d'acide carbonique dans l'air du sol a été en moyenne (pour 1000 vol.) :

	SOL avec couverture de paille.	SOL NU.
	—	—
1878	6.750	8.830
1884	5.567	4.681

Ces différences doivent être attribuées aux circonstances climatériques.

En 1878, les pluies furent plus régulières et plus abondantes qu'en 1884; par suite, les oscillations du taux d'humidité furent moindres dans la première année que dans la seconde, où il y eut souvent des périodes sèches et de hautes températures. En 1878, la température plus élevée du sol nu, comparée à celle du sol couvert, activa la décomposition des matières organiques qui fut ralentie, au contraire, en 1884, par la trop grande sécheresse du sol, si bien que le sol couvert, étant plus humide, prit le dessus. Concluons que l'érémacausis est plus intense dans les années humides sur les sols nus que sur les sols couverts et que c'est le contraire dans les années sèches.

Les différences ne sont pourtant pas très grandes ; en somme, l'influence d'une couverture morte sur les processus de décomposition peut être comparée à celle de la jachère, et l'on doit employer ce procédé pour les mêmes motifs que la jachère. Il rendra les meilleurs services quand le sol a été fortement desséché soit par une sécheresse persistante, soit par des plantes en massif serré exigeant beaucoup d'eau. Le maintien de l'humidité normale dans le sol sous la couverture de fumier et l'obstacle à la formation d'une croûte influencent directement et indirectement la végétation de la récolte suivante. Grâce au libre accès de l'air, à l'humidité presque constante du sol en contact, l'érémacausis est active dans la couche de fumier et les aliments qui s'y forment, dissous par les pluies, se disséminent parfaitement. On a objecté que l'ammoniaque contenue dans le

1. E. WOLLNY, *Forschunjen, etc.*, vol. III, 1880, p. 7, et vol. IX, 1866, p. 851.

fumier ou se formant par la décomposition se perdait dans l'atmosphère ; les recherches de H. Hellriegel[1] ont montré que les quantités ainsi volatilisées étaient négligeables. Le sol restant humide sous le fumier absorbe intégralement le gaz qui s'en dégage. C'est seulement quand on épand en plein été du fumier très consommé qu'on ne peut éviter une perte, et aussi quand le sol est compact et en pente, parce qu'alors, par les grandes pluies, les eaux de ruissellement entraînent les matières nutritives. On remédie à cet inconvénient en ameublissant le sol avant de le couvrir de fumier et en facilitant ainsi la pénétration de l'eau.

Quand le sol, au moment de l'épandage du fumier, est déjà très humide, cette pratique peut amener des pertes assez importantes, surtout en nitrates. On a vu plus haut (p. 439) que la couverture augmentait le volume de l'eau de drainage et, par suite, le danger d'entraînement des principes nutritifs avec l'eau d'infiltration quand le sol est fortement imbibé. Cette perte sera d'autant plus grande que la faculté d'imbibition du sol et son pouvoir absorbant seront plus faibles et aussi les pluies plus abondantes. Aussi cette pratique ne devrait surtout pas être employée sur les terrains sablonneux ou de constitution analogue, ou bien seulement au cas où ils souffrent de sécheresse.

Sur des sols compacts dont la perméabilité est faible et le pouvoir absorbant élevé la perte en question est moindre ; mais il y a des inconvénients d'une autre sorte qui doivent faire renoncer à l'épandage d'une couche de fumier si le sol est bien humecté. De l'eau en excès s'accumule alors dans la couche arable, puisque l'évaporation est très diminuée ; elle entrave l'érémacausis des matières organiques et rend bien plus difficile la formation du sol en grumeaux par les travaux ultérieurs.

Quand la couche de fumier passe l'hiver sur ces sols compacts, il en résulte encore un autre inconvénient : l'influence de la gelée sur l'ameublissement du sol est très atténuée, parce qu'il est protégé par cette couverture de fumier contre les variations brusques de température[2].

1. H. Hellriegel, *Chemischer Ackersmann*, 1855, p. 39, et 1856, p. 87.
2. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. VI, 1883, p. 198.

La question de savoir si l'on doit répandre et laisser le fumier à la surface doit être résolue, pour chaque localité, d'après des considérations analogues à celles qui viennent d'être exposées. (Voir *Note K*.)

Ce que nous avons dit plus haut (p. 193-200) fait prévoir dans quelle mesure l'érémacausis et la nitrification seront influencées par l'adjonction des sels contenus dans les engrais chimiques. Dès que la solution du sol est portée par eux à une assez haute concentration, érémacausis et nitrification subissent une diminution notable. Si la dose d'engrais contenant des sels facilement solubles est excessive, ou si le sol possède un taux d'humidité médiocre et que les pluies ultérieures soient rares, il y a dommage causé.

Dans ces conditions, la décomposition des matières organiques et l'absorption de l'eau par les plantes sont entravées et la fertilité du sol est désavantageusement influencée de ces deux côtés.

C'est pour cela que, par exemple, le purin, riche en carbonates d'ammoniaque et de potasse, employé sur des prairies dont le sol est sec, nuit à leur végétation et peut même les faire périr. On a observé des effets analogues quand les sels des fumures étaient répandus à trop haute dose sur des sols trop peu humides et quand il faisait ensuite un temps sec.

Érémacausis et nitrification sont, suivant la dilution de la solution du sol, influencées par les fumures dans diverses directions. Sous la condition d'une dilution suffisante, l'addition de carbonates et phosphates alcalins et alcalino-terreux favorise ces deux processus ; les chlorures agissent en sens contraire. Les sulfates entravent l'oxydation du carbone et activent au contraire la nitrification.

La chaux caustique et le carbonate de chaux retardent, il est vrai, la décomposition des matières organiques inaltérées, mais accélèrent celle des matières en train de s'altérer (p. 190) et aussi la nitrification (p. 193). Sur les sols où, par suite de l'excès d'eau (marais, tourbières) ou bien de la grande finesse des particules (sols argileux), les matières organiques subissent la putréfaction, où il se forme, en conséquence, de grandes quantités d'acide humique libre, les chaulages ou les marnages influent énergiquement sur la fertilité en mettant cet acide en combinaison. Comme l'humus acide est nuisible, on comprend que la chaux caustique soit déjà utile en le sup-

primant. Ajoutons que les composés qui se forment se décomposent plus vite que l'acide libre (p. 191) et fournissent donc de plus fortes doses de principes nutritifs.

Cette action s'étend aussi au sulfate de fer qui se rencontre souvent dans ces circonstances et qui est nuisible à la végétation. Par l'adjonction de chaux (hydrate ou carbonate) il se forme du gypse et du protoxyde de fer hydraté des plus oxydables qui, en présence de l'air, se transforme bientôt en peroxyde indifférent à la végétation. Il est à remarquer qu'en outre la nitrification est en même temps favorisée ; car elle est nulle tant qu'il existe du sulfate de fer dans le sol (p. 196).

Venons enfin à l'action que les engrais exercent sur l'état physique du sol et les processus de décomposition qui en dépendent. L'humus qui s'accumule en plus ou moins forte quantité dans le sol, à la suite des engrais organiques qu'on y met (p. 393), favorise grandement la mise en grumeaux dans les sols compacts et augmente la faculté d'imbibition dans les sols sablonneux légers ; dans les deux cas il améliore les qualités défavorables à l'érémacausis. De même les sels contenus dans ces engrais, même à petites doses, ont nécessairement aussi une action importante, puisqu'elle influe sur la texture des sols (p. 461).

Les travaux de Ad. Mayer, E. W. Hilgard et W. J. A. Bliss[1] nous donnent de précieuses indications sur la part que prennent certains sels à la texture des sols argileux à grain fin. Si l'on délaie de l'argile dans l'eau, en faisant bouillir pendant plusieurs jours du kaolin fin avec de l'eau et en remuant souvent, puis qu'on laisse reposer, les éléments se déposent suivant leur densité. Si l'eau contient de petites quantités d'alcalis, de phosphates et carbonates alcalins, cette précipitation est accélérée ou même elle se fait en masse. Dans le dépôt, les particules sont étroitement juxtaposées (texture pulvérulente). Il en va tout autrement si l'on mélange à l'eau de faibles

---

1. Ad. Mayer, *Forschungen, etc.*, vol. II, 1879, p. 251. — E. W. Hilgard, *ibid.*, vol. II, 1879, p. 441. — W. J. A. Bliss, *Physical Review*, vol. II, n° 2, 1895, p. 241. — Voir aussi Ad. Mayer, *Journal für Landwirtschaft*, vol. XXVII, 1879, p. 389. — Th. Schlœsing, *Journal de l'Agriculture*, 1874, n[os] 287-290. — G. Reinders, *Landwirthschaftliche Versuchsstationen*, vol. XIX, 1876, p. 190. — W. Durham, *Chemical News*, t. 37, n° 949, et t. 30, n° 767.

doses d'acides minéraux, chlorhydrique, nitrique, sulfurique ou de leurs sels. Alors l'argile se précipite en flocons, les éléments se réunissent en agrégats (texture grumeleuse). Le dépôt est par suite plus meuble et occupe un plus grand volume que si l'on a employé de l'eau pure ou des solutions étendues d'alcalis ou de carbonates alcalins. Les sédiments dont les éléments ont la finesse de ceux de l'argile se comportent comme elle.

Il résulte de là que les engrais qui renferment des carbonates alcalins rendent plus difficile et quelquefois impossible la formation du sol en grumeaux.

E. W. Hilgard[1] cite à ce sujet un curieux exemple. En Californie il y a des sols que tout le monde appelle *sols alcalins :*

« Ils contiennent tant de sels facilement solubles, que ceux-ci viennent s'effleurir à la surface. Ceux qui renferment des carbonates alcalins se reconnaissent aisément à leur compacité, à la difficulté, la presque impossibilité de leur donner une couche arable propre. Souvent une excellente terre alterne avec ces parties alcalines de telle sorte qu'on ne peut cultiver l'une sans l'autre. Le champ est parsemé de taches. Si on le laboure en croix, puis qu'on le herse jusqu'à ce que l'instrument n'ait plus d'effet, les parties alcalines se transforment en un tas de mottes arrondies depuis la grosseur d'un pois jusqu'à celle d'une bille de billard ; mais il n'y a pas de couche arable. Avec le même travail les parties plus hautes, sans alcalis, ressemblent à un amas de cendres. »

La solution d'un brun noir extraite de ces sols alcalins a donné 0,251 p. 100 de résidu solide, dont 0,158 était soluble dans l'eau. La partie soluble consistait en

CARBONATE de soude.	CHLORURE de sodium.	SULFATE de soude.	PHOSPHATE de soude.
52,74	38,08	13,26	1,83

La dose du carbonate de soude s'élevait pour la masse du sol à 0,08 p. 100. Cette faible quantité a suffi pour donner à la terre la texture compacte dont on vient de parler.

1. *Loc. cit.* — Voir aussi *Forschungen, etc.*, vol. XVI, 1893, p. 131.

« Dans ces cas, l'addition d'une dose de gypse, suffisante pour opérer une double décomposition a un effet frappant, qui s'observe en petit, mais qui, naturellement au bout d'un certain temps et après un travail répété, améliore en grand l'état physique. L'influence caustique du carbonate sur les graines et les plantes est tellement annihilée par l'addition de gypse, que le blé et le maïs poussent sans difficulté là où ne végétaient que l'herbe alcaline (*Brizopyrum*) et les chénopodées. » L'action du gypse est facile à comprendre ; il réagit sur le carbonate de soude pour former du sulfate de soude qui n'a plus les propriétés caustiques du carbonate.

Quant aux autres sels, on devrait pouvoir conclure des expériences précédentes que leur adjonction doit aider à la mise en grumeaux du sol. Cela n'arrive pourtant que s'ils se trouvent dans la solution du sol. Dès qu'ils sont dissous par les eaux météoriques qui s'infiltrent, ce qui se fait d'autant plus vite que la plupart de ces sels ne sont pas absorbés par le sol, la terre se tasse à ce point qu'elle devient presque imperméable pour l'air et pour l'eau et qu'elle peut amener directement ou indirectement une très notable diminution de fertilité. Cette action nuisible ne se manifeste pas tout d'abord ; au contraire, leur emploi donne souvent des récoltes élevées jusqu'à ce qu'il se produise un recul subit quand la plus grande partie des sels sont dissous et ne peuvent plus influer sur la texture grumeleuse du sol.

D'après ce qui précède il n'est pas douteux que des fumures abondantes avec des matières contenant de fortes doses de chlorures et de nitrates, voire de phosphates et de sulfates, comme aussi les inondations d'eau salée ont une action nuisible directe ou indirecte sur la fertilité de tous les sols à éléments très fins, notamment des sols argileux, parce qu'ils prennent pour longtemps un état physique (texture pulvérulente) défavorable à l'érémacausis et à la végétation. Ce fait se manifeste nettement, par exemple, dans la détérioration mécanique des sols argileux par des fumures répétées de nitrates seuls. « Un sol ainsi forcé donne d'abord, on le sait, de superbes récoltes, puis il survient subitement un recul qui, au jugement des praticiens exercés, n'est pas enrayé simplement par une fumure complète comme dans les sols sablonneux. Le sol est ruiné physiquement pour long-

temps ; aussi les Anglais, si perspicaces en matière agricole, ont frappé d'interdiction les fumures nitratées. » Les chlorures agissent de même.

De tous les engrais employés dans la pratique, la chaux caustique exerce la plus heureuse influence sur l'état mécanique du sol. Il s'y forme alors des agrégats meubles (grumeaux) qui résistent longtemps, souvent plusieurs années, à toutes les causes extérieures de destruction. L'expérience montre que le chaulage rend les sols argileux plus faciles à travailler[1]. HILGARD a trouvé que, « si l'on fait passer du gaz acide carbonique pendant 24 heures à travers un magma d'argile mélangée de chaux caustique, où dès lors toute réaction alcaline a disparu, la plasticité n'y est pas rétablie même après la dessiccation et la disparition de la solution de chaux carbonatée. » Pour amener, par ce moyen, un effet heureux sur l'état mécanique du sol, il faut de plus grandes quantités de chaux caustique que dans le cas où la chaux doit être ajoutée comme matière nutritive ou pour provoquer dans le sol des combinaisons chimiques. Si l'on veut améliorer physiquement les sols argileux, il faut employer de 5000 à 10000 kilogr. de chaux caustique par hectare et plus, suivant la compacité. Ces chaulages doivent être répétés tous les 6 ou 8 ans.

Le carbonate de chaux produit le même effet que la chaux caustique, mais à un bien plus faible degré. En mélange avec d'autres terres (marne) et surtout avec du sable il agit favorablement par ses grosses particules sur l'état physique des sols argileux.

7. — Culture des sols humiques

a) *Prairies.*

Les prairies permanentes subissent avec le temps des modifications qui consistent essentiellement en un accroissement continu de matières organiques sous forme d'humus acide, si bien que les couches superficielles du sol prennent un caractère tourbeux (tourbe de

1. FR. SCHULZE, *Poggendorff's Annalen*, vol. 129, p. 366. — FR. HABERLANDT, *Forschungen, etc.*, vol. I, 1878, p. 148.

prairie). A ces accumulations d'humus correspond une augmentation du taux d'eau à cause de la faculté extraordinaire d'imbibition de ces humus. La conséquence de ces modifications du sol des prairies est une diminution constante, non seulement dans la quantité de la récolte, mais encore dans sa qualité ; les bonnes plantes disparaissent pour faire place aux herbes acides.

On peut le mieux se rendre compte des causes qui amènent cette modification désavantageuse du sol des prairies en comparant dans les champs et les prés la destinée des détritus organiques qui restent enfouis. Dans les champs, le sol est rendu perméable par les fréquents labours ; les matières organiques sont soumises à l'érémacausis et peuvent se volatiliser. Ce mode de décomposition est encore favorisé par ce fait que le champ reçoit une température plus élevée, à cause de l'état moins serré des plantes, et aussi pendant le temps de jachère qui s'écoule entre la récolte de la première culture et l'ensemencement de la suivante.

Il en va tout autrement des prairies. Comme le sol n'y est jamais ameubli, l'accès de l'air y est plus ou moins entravé, non seulement parce que le sol y est plus compact, mais aussi parce qu'un lacis serré de racines obstrue tous les interstices.

Ajoutons que le sol, constamment couvert de plantes vivantes, se maintient à une température relativement inférieure.

Ces deux circonstances, accès limité de l'air et faible échauffement, font que les racines qui meurent chaque année se décomposent non par érémacausis, mais par putréfaction, mode caractérisé par l'accumulation d'humus acide (tourbe). A mesure que ces matières humiques augmentent, la fertilité du sol diminue ; car, pour la raison déjà donnée, l'humidité augmente dans la même proportion, si bien que le terrain arrive finalement à l'état marécageux et devient impropre à porter des récoltes satisfaisantes.

Divers procédés ont été proposés pour obvier à ces inconvénients. Ils reposent essentiellement, soit sur le drainage et l'apport de substances propres à enlever l'excès d'eau et à combiner les acides humiques, en détruisant les produits nuisibles de désoxydation, soit sur l'ameublissement plus ou moins profond du sol par le labour de la prairie, avec ou sans destruction du gazon.

En tout cas il est d'abord nécessaire de régulariser l'humidité du sol, ce qu'on obtient par le drainage en se conformant au besoin d'eau des graminées, qui est plus élevé que celui des plantes agricoles. Ces différences dans le besoin d'eau ne tiennent pas à la nature spécifique des plantes, mais à leur état plus serré et à leur durée de végétation. Les plantes agricoles, beaucoup plus espacées et à durée de végétation plus courte, absorbent par suite beaucoup moins d'eau que les graminées. Si l'on veut des chiffres, on peut admettre, en se fondant sur les expériences précédentes, que les céréales exigent 40 à 60 p. 100 et les graminées 60 à 80 p. 100 des quantités d'eau que le sol peut contenir quand il est saturé. Eu égard à ces grandes exigences en eau des herbes des prairies, le drainage présente quelques difficultés, parce que, en employant les procédés habituels (fossés à ciel ouvert et tuyaux de drainage), on enlève facilement au sol des quantités d'eau telles que le taux d'humidité descend au-dessous des limites qui donnent le maximum de récolte. Aussi, pour traiter convenablement le sol des prairies, doit-on se préoccuper de lui fournir une humidité suffisante à l'époque de la plus active croissance, c'est-à-dire de la plus haute exigence des plantes en eau. Dans le procédé à ciel ouvert, on y arrive de la façon la plus simple en munissant les fossés de vannes d'arrêt qui peuvent, suivant le besoin, et surtout pendant la saison chaude, empêcher l'écoulement ; dans le drainage souterrain, on emploie des systèmes de fermeture qui permettent de régler parfaitement l'humidité nécessaire aux plantes, quelquefois avec le secours de l'eau souterraine.

Les résultats obtenus par le drainage ou le chaulage sont en général insuffisants pour détruire cet état défavorable du sol, par la simple raison que ces opérations n'en suppriment qu'incomplètement les causes. Les fossés à ciel ouvert ou les tuyaux souterrains suppriment à la vérité l'excès d'eau ; les chaulages font passer l'acide humique à l'état combiné et les composés ferrugineux solubles du sol (sulfate de fer) deviennent inoffensifs ; mais ces modifications sont insuffisantes pour augmenter la fertilité, parce que, après comme avant, bien qu'à un moindre degré qu'avant, l'accès de l'air dans le sol est toujours entravé d'une façon dommageable. Tant que cet état persiste, les fumures avec principes nutritifs appropriés ne

sortent pas leur plein effet et ne rapportent généralement pas leur rente.

Pour améliorer le sol à fond, il est à recommander de retourner la prairie. On peut le faire soit en détachant la couverture de gazon, en la mettant de côté, en labourant le sol, en lui donnant les engrais nécessaires, puis en y faisant passer le rouleau après avoir remis le gazon en place, soit en détruisant tout le gazon, en cultivant le sol pendant une ou plusieurs années comme terre de labour et réensemençant en herbe.

Le premier procédé ne trouve son emploi que quand le gazon est essentiellement constitué de bonnes graminées avec peu de mauvaises herbes et que le sol n'a pas encore revêtu l'état tourbeux à une grande profondeur. Dans le cas contraire, il sera plus logique de détruire le gazon et de ne rendre le sol à sa première destination qu'après une culture transitoire de plantes agricoles, d'autant plus qu'il n'est pas possible, en utilisant l'ancien gazon, d'exposer, comme ce serait désirable, longtemps le sol à l'air atmosphérique. En outre, les frais occasionnés par l'emploi de ce procédé sont très élevés et ne peuvent que rarement être payés par un supplément de récolte.

Là où la couverture de gazon doit être réappliquée, on procédera pour le mieux de la manière suivante. L'enlèvement du tapis de gazon se fait à l'aide d'une charrue ordinaire ou d'une charrue à gazon jusqu'à 10 centimètres de profondeur. Dans un terrain inégal les sillons de la charrue sont divisés à la houe en morceaux de 30 à 40 centimètres de longueur ; dans les terrains plats, on a avantage à se servir, pour ménager le travail manuel, d'un rouleau découpeur qu'on fait marcher perpendiculairement aux sillons ou qui tranche le tapis de gazon devant la charrue perpendiculairement à sa direction. L'instrument consiste essentiellement en un rouleau de bois autour duquel sont adaptés des couteaux circulaires de 10 centimètres de hauteur et espacés de 30 à 40 centimètres. Le rouleau doit être très lourd et pas trop long pour que les plaques de gazon soient tranchées aussi régulièrement que possible.

Ces plaques de gazon sont mises de côté ; on fume alors le sol, on y fait passer la charrue, l'extirpateur et la herse, et on remet le

gazon en place. Pour hâter sa reprise, on le comprime avec un fort rouleau.

Dans le but de simplifier ce procédé, LAACKE a construit dernièrement une charrue qui ameublit la couche sous-jacente au gazon de la manière suivante : « Le gazon est découpé au moyen de deux couteaux en une bande aussi épaisse que l'on veut et qui passe sur une planche cintrée au-dessous de laquelle se trouve une herse à pointes tranchantes. Pendant que le gazon glisse sur la planche cintrée, la herse ameublit le sol compact sur lequel il reposait, puis le gazon se replace dans sa position primitive sur le sol travaillé. » Bien que l'on fasse ainsi un bon travail, il est cependant beaucoup moins efficace que celui qui est exécuté, comme nous venons de le dire, avec une charrue ordinaire ; aussi les résultats obtenus restent-ils loin en arrière de ceux que donne un ameublissement plus profond.

Quand le sol est fortement tourbeux, ce procédé ne suffit plus à amener une amélioration importante dans la fertilité, parce que le temps pendant lequel le sol reste exposé à l'air est trop court. Dans ce cas, on obtiendra un bien meilleur résultat en détruisant complètement le gazon et en utilisant le sol comme terre de labour pendant une ou plusieurs années avant de le remettre en pré. On peut détruire le gazon, soit en le brûlant, soit en l'enfouissant par la charrue.

Si l'on adopte le premier procédé, on labourera le sol au printemps ou à l'automne jusqu'à 10 ou 15 centimètres de profondeur, suivant l'épaisseur de la couche de tourbe. Par temps sec, ce qui a été labouré à l'automne peut être brûlé en mai, et ce qui a été labouré au printemps peut être brûlé en automne (août ou septembre). On met le gazon sec à feu en allumant les mottes du côté opposé au vent et en y jetant constamment avec force la terre brûlante. Après environ seize à vingt-quatre heures, la couche de gazon est complètement incinérée. Si le temps est défavorable à la dessiccation des mottes, on les découpe en morceaux, comme on vient de le dire, en en plaçant deux l'un contre l'autre en forme de toit pour exposer à l'air la plus grande surface possible et amener une prompte dessiccation.

Si le temps est humide, il faut rassembler les morceaux de gazon en petits tas, et les brûler dès qu'ils sont secs. Pour empêcher que le feu ne pénètre trop profondément dans la couche de tourbe, on recommande de remplir d'eau les fossés d'assainissement et d'humecter le sol avec cette eau.

Tandis que, par l'emploi du premier procédé, les matières organiques sont complètement détruites et qu'il ne reste que les matières incombustibles sous forme de cendres, ces éléments organiques et les gaz qui se forment, notamment l'ammoniaque, restent en partie dans la combustion en tas. A ce point de vue, ce dernier procédé doit présenter de plus grands avantages, d'autant plus que le but à atteindre, qui est la destruction des herbes, est en même temps rempli.

Avec les mottes de gazon desséché on dresse des tas en forme de ruches d'abeilles, hauts de un mètre et ayant un mètre de diamètre. Les vides intérieurs sont reliés à l'air extérieur par un petit trou pratiqué au ras du sol du côté du vent. Avant de finir le tas, on y met du combustible (menu bois, bruyère, paille, etc.) et on laisse enfin dans le revêtement du tas une fois terminé un petit trou d'aérage. Les gazons ne doivent pas être trop serrés l'un contre l'autre; on dispose, à côté, des mottes de gazon humide pour les jeter sur le tas quand il est allumé, et régler ainsi la combustion. Les tas sont allumés au moyen de la paille qui se trouve dans le trou. Dès que le feu est bien pris, on couvre le trou du haut avec du gazon de manière à ne laisser qu'une petite ouverture et à forcer la flamme à pénétrer par les vides à travers les gazons. Si la flamme devient trop forte sur un point, on le recouvre aussitôt avec une des mottes préparées à cet effet. Il faut surtout prendre garde que les tas ne brûlent trop vite; ils doivent s'éteindre lentement, peu à peu. Finalement on les réduit en fragments, s'ils ne s'émiettent pas d'eux-mêmes, et l'on couvre la place du foyer avec les mottes qui gisent encore sur le sol pour les brûler.

Les cendres obtenues par l'une ou l'autre de ces méthodes, ainsi que les détritus à demi brûlés, sont répartis également sur la surface et enfouis par un labour à plat. Pour incorporer au sol les cendres dès qu'elles sont obtenues, on place les tas en ligne et on n'en

allume qu'autant qu'il faut pour qu'on puisse enfouir les résidus dans la soirée du même jour. Quelques jours après, on herse ; on laboure ensuite à pleine charrue et on installe des récoltes sarclées (betteraves ou pommes de terre). La culture de ces végétaux se recommande, parce que, grâce aux fréquents labours qu'exige leur végétation, le sol reste exposé à l'air sous la plus grande surface possible. Si le sol est très tourbeux, on continuera la culture agricole l'année suivante, et, s'il le faut, la troisième avec des vesces, de l'avoine, des pois, etc. Puis, après une fumure, on procède au réensemencement avec des fourrages appropriés.

Quand l'état du sol est moins défavorable, c'est-à-dire que le caractère tourbeux est moins accusé, une modification aussi profonde que celle qui résulte de la combustion d'une partie du sol n'est pas nécessaire et il suffira dès lors de l'utiliser pendant quelques années comme terre de labour. On effectue, dans ce cas, la destruction du tapis de gazon en raclant superficiellement sur trois ou quatre centimètres d'épaisseur, en émiettant la couche ainsi raclée par plusieurs coups de herse, et, une fois le gazon desséché, on laboure profondément le sol avec une charrue munie d'un coutre. Le sol ainsi traité doit être cultivé de la même façon que le sol écobué dont il vient d'être question ; il faudra, pour les motifs déjà donnés, garnir ce sol de plantes sarclées.

Les règles que nous recommandons ici sont exactement celles que l'on applique dans la *culture des prairies par alternance*. Étant donnés les avantages de ce système, il doit paraître étonnant qu'il soit si rarement pratiqué. Le mode de culture actuellement en usage, mode par lequel le sol fournit constamment du foin, est irrationnel en ce sens que, par suite du manque d'air et de l'abaissement de la température, il se fait une accumulation de matières organiques qui nuit grandement, soit directement, soit indirectement, à la fertilité de ces cultures si importantes dans l'économie agricole. Puisque les moyens ordinairement employés (assainissement, chaulage, fumure) se sont montrés insuffisants, l'expérience l'a prouvé, pour détruire cette mauvaise composition du sol des prairies, il serait bien temps de rompre avec ce système et de le remplacer par un autre plus logique. De tous les procédés proposés, celui qui offre incontesta-

blement les plus grands avantages consiste à alterner la culture de la prairie avec une courte culture agricole, à des périodes plus ou moins longues suivant l'état du sol. Sont évidemment exceptées les prairies exposées à des inondations régulières. Mais, toutes les autres, qui forment la majeure partie, devraient être soumises à ce traitement, le seul qui permette d'obtenir le maximum de production.

b) *Tourbières.*

Dans le défrichement des tourbières, comme dans toutes les entreprises de cette espèce, on ne peut évidemment voir réussir les moyens employés que s'ils modifient ces propriétés du sol qui s'opposent à la bonne végétation des plantes cultivées. Comme les tourbières présentent à cet égard de grandes différences, les opérations à faire ne doivent pas être effectuées d'après un plan général, mais spécialement pour chaque cas. En outre, on ne pourra s'empêcher de prendre en considération les circonstances économiques qui sont aussi d'un grand poids dans le choix des méthodes de culture.

Il faut chercher les causes de la faible fertilité des sols tourbeux aussi bien dans les propriétés physiques que dans certaines propriétés chimiques (p. 300 et 329).

Parmi les *propriétés physiques* défavorables, on doit d'abord signaler les rapports de ces sols avec l'eau; ils l'emportent sur tous les autres par leur faculté d'imbibition (p. 340). Il s'ensuit qu'il s'accumule dans les tourbières de grandes quantités d'eau ; mais ce grand pouvoir d'imbibition n'est pas, comme on l'a souvent admis, la cause principale de leur état mouilleux, puisqu'elles éprouvent un desséchement nuisible à la végétation dès qu'elles sont soumises à un assainissement intense atteignant une grande profondeur. L'état mouilleux est bien plutôt provoqué, soit par l'imperméabilité du sol sous-jacent, soit par l'afflux latéral (p. 289) ; il est nuisible dans la culture des tourbières, comme dans celle de tout autre sol, par l'obstacle qu'il apporte à la pénétration de l'air ; il arrête l'érémacausis et donne lieu à la formation de substances nuisibles à la végétation.

En outre, les grands changements de volume du sol tourbeux, lors des alternatives de sécheresse et d'humidité, de gel et de dégel, exercent en hiver un effet nuisible sur les plantes, en soulevant peu à peu leurs racines et en provoquant ce que l'on appelle le *déchaussement*. Les plantes perdent petit à petit leur assiette solide dans le sol et gisent à la surface ou bien elles sont menacées dans leur existence par la gelée. C'est pour cela que les cultures d'hiver sont généralement exclues des sols tourbeux non transformés.

Sous le rapport de la chaleur, les tourbières ont une composition défavorable à la végétation. Ce sont surtout les gelées nocturnes du printemps qui, plus fréquentes et plus tardives que sur les sols minéraux, causent souvent de grands dommages (p. 372). Les plantes sensibles aux basses températures sont pour cela facilement compromises sur les tourbières. Quand la température s'élève, la tourbe s'échauffe peu en comparaison des autres sols, tant à cause de sa faible conductibilité que de la dépense de calorique due à sa forte évaporation (p. 365). Cette faible conductibilité est aussi la cause du lent dégel des tourbières au printemps et de la conservation de leur chaleur quand la température s'abaisse ; c'est le seul côté favorable à la végétation que présentent les conditions thermiques de la tourbe.

Parmi les *propriétés chimiques* de ces sols, il y a surtout à considérer le taux en principes nutritifs et l'aptitude à la décomposition. Comme on l'a déjà montré (p. 316), les tourbes se distinguent par leur pauvreté en potasse, mais sont dotées d'éléments nutritifs en proportions variables suivant leur mode de formation. Les tourbières supra-aquatiques ont en général une composition plus régulière que les tourbières infra-aquatiques, mais elles sont sensiblement plus pauvres en éléments les plus précieux pour l'alimentation, tels que l'azote, la chaux et l'acide phosphorique. Ajoutons que l'érémacausis par laquelle les matières nutritives passent à l'état assimilable est bien plus lente dans les tourbières supra-aquatiques que dans les autres.

La tourbe contient parfois des principes qui sont inoffensifs par eux-mêmes, mais qui, après absorption d'eau, forment des combinaisons nuisibles à la végétation. Tel est le sulfure de fer ($Fe S^2$) qui, lorsqu'il vient en contact avec l'air, peut devenir si néfaste. Il se

transforme en sulfate de fer et en acide sulfurique, deux substances qui, dans la proportion où elles existent parfois, détruisent toute végétation.

De ce que nous venons de dire il résulte que, dans la mise en culture des tourbières, il faut envisager l'amélioration aussi bien des propriétés physiques que des propriétés chimiques.

En tout cas, avant toute autre amélioration, il faut songer à assainir le sol, car son état mouilleux est la première cause de son infertilité.

Il n'y a pas de terrain qui offre autant de difficultés à l'assainissement et qui exige plus de précautions. Ceci se comprendra si l'on considère qu'avec l'abaissement du plan d'eau par les procédés ordinaires (fossés ou tuyaux souterrains) on soutire aisément au sol de telles quantités d'eau qu'il n'en a plus assez et prend alors un état aussi peu propre que l'état mouilleux à l'obtention du maximum de récoltes. On doit surtout chercher la cause de ce desséchement excessif dans la faculté extraordinaire d'évaporation de la masse tourbeuse (p. 347). Avec une sécheresse persistante, la provision d'eau peut diminuer à un tel degré que les plantes meurent de soif.

Une fois arrivé à cet état, le sol est ruiné pour longtemps, parce que la tourbe, à cause de son inhumectabilité, ne se laisse plus humidifier du tout ou seulement avec la plus grande difficulté. Pour ces raisons l'assainissement doit être conduit de manière que la végétation dispose, dans tous les cas, de la provision d'eau reconnue nécessaire pour l'obtention du maximum des récoltes. On devra surtout se préoccuper d'abaisser convenablement le plan d'eau et de garder la possibilité de le régler suivant les exigences des cultures en eau et les circonstances climatériques. On ne pourra en général s'attendre à un haut rendement que si le sol tourbeux reste toujours bien humide ; car on sait, abstraction faite des exigences variables des récoltes, qu'il doit contenir plus d'eau qu'aucun autre sol pour amener les plantes à leur complet développement (p. 351).

Si l'on veut des chiffres, on peut dire qu'il suffit que le plan d'eau soit, sous le gazon, à $0^m,5$-$0^m,7$ et, sous les champs, à $0^m,8$-1 mètre au-dessous de la surface. En outre, il faudra s'arranger pour que l'on puisse arrêter le fonctionnement des appareils d'assainissement dans les périodes de sécheresse ou bien dans celles où une stagnation

d'eau est nécessaire. On y arrive simplement en installant des vannes à des places déterminées du système d'assainissement.

Étant donnée l'horizontalité des tourbières, l'assainissement s'en fait le plus commodément par des fossés espacés de 20 à 30 mètres dans les tourbières infra-aquatiques et de 10-15 mètres, au plus de 20 mètres, dans les tourbières à sphaigne, plus aqueuses. La profondeur se règle d'après le niveau que doit garder la nappe souterraine après l'assainissement, d'après la profondeur de la base minéralogique dans les cas où elle est employée à l'amélioration des qualités physiques de la tourbière.

Pour y arriver on a employé deux procédés : l'un consiste à rejeter sur la tourbe le sable provenant du creusement des fossés et à le mélanger avec elle ; dans l'autre méthode, essayée par Rimpau à Cunrau et avec grand succès, on recouvre le sol d'une couche de sable de 10-12 centimètres qui reste telle quelle sans qu'on la mélange jamais à la tourbe sous-jacente [1].

Pour juger des avantages de l'un ou de l'autre procédé, il est évidemment utile de savoir dans quelle mesure ils peuvent améliorer les sols tourbeux. M. Fleischer [2] d'abord et moi ensuite [3] nous avons fait des essais propres à éclairer le jugement à cet égard. Ils ont trait aux modifications qu'éprouve le sol tourbeux dans ses rapports avec l'humidité et la chaleur sous l'influence du sable en mélange ou en couverture.

Pour déterminer comment se comportaient, vis-à-vis de l'humidité, des sols traités de diverses façons, j'ai employé des lysimètres de 30 centimètres de hauteur et de 400 centimètres carrés de section ; ils étaient garantis contre l'échauffement latéral ; on les pesait chaque semaine. Le poids des sols séchés à l'air étant connu, ainsi que les volumes des eaux d'arrosage et d'infiltration, on pouvait calculer ai-

---

1. Le domaine de Cunrau, situé au nord de la province de Saxe, dans l'Altmark, aux sources de la Jeetze, a fait l'objet d'une importante monographie due à M. Pierre de Maillard et insérée dans les *Annales de la Science agronomique française et étrangère,* 1891, t. II, p. 417-472. (Traduction.)

2. M. Fleischer, *Landwirthschaftliche Jahrbücher,* par H. Thiel, vol. XX, 1891, p. 771-804. Voir aussi : F. Seyfert, même recueil, p. 854-871.

3. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. XVII, 1894, p. 229.

sément la quantité d'eau existant dans les sols en expérience ainsi que l'évaporation d'une pesée à l'autre.

Les sols placés dans des conditions identiques ont renfermé pendant la saison d'été (1er avril-30 septembre) les taux moyens suivants d'eau exprimés en grammes :

ANNÉES.	SOL D'UNE TOURBIÈRE à sphaigne tel quel.	à sphaigne mélangé avec du sable.	à sphaigne couvert de 10 centim. de sable.	infra-aquatique tel quel.	infra-aquatique mélangé avec du sable.	infra-aquatique couvert de 10 centim. de sable.
1892	5 495	4 885	5 599	5 537	4 619	5 328
1893	4 834	4 205	5 695	4 740	3 778	5 160
Moyennes. . .	**5 164**	**4 545**	**5 647**	**5 139**	**4 199**	**5 244**
Rapport . . .	100	88,0	109,4	100	81,7	102,4

Il ressort de ces chiffres que *le sol couvert de sable contient le plus d'eau, puis vient la tourbe telle quelle, et c'est la tourbe mêlée de sable qui a le moins d'humidité.*

Ces différences n'apparaissent pourtant que dans les moyennes et subissent, suivant les conditions climatériques, des modifications multiples qui, d'après les observations isolées qu'il serait trop long d'insérer, se résument en ceci : par la sécheresse la tourbe non couverte se comporte à peu près comme celle qui est mélangée de sable ; elle est un peu moins humide pourtant ; mais par les temps très pluvieux et froids c'est elle au contraire qui absorbe le plus d'eau et qui dépasse sensiblement sous ce rapport la tourbe avec sable en mélange ou en couverture. Concluons que *les variations d'humidité sont sensiblement plus grandes dans le sol tourbeux non modifié que dans celui qui est mêlé de sable, où elles sont, à leur tour, plus importantes que dans la tourbe recouverte de 10 centimètres de sable.*

Pour bien comprendre la raison de ces faits, il faut examiner de plus près le rapport du sol avec l'eau. Comme le taux d'eau de chaque sol, dans les conditions de la nature, à précipitations atmosphériques égales, abstraction faite de la faculté d'imbibition, dépend essentiellement de l'évaporation et de l'infiltration, ce sont ces deux propriétés qu'il faut considérer.

L'infiltration, dans les essais en question, se fit de la manière suivante :

EAU D'INFILTRATION EN GRAMMES.

ANNÉES.	PLUIE.	Sol de tourbière à sphaigne			Sol de tourbière infra-aquatique		
		non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.	non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.
—	—	—	—	—	—	—	—
1892 . .	27 338	6 099	10 763	13 998	10 194	14 902	16 464
1893 . .	20 286	2 911	5 579	10 020	5 421	7 314	11 611
Moyennes.	23 812	**4 505**	**8 171**	**12 009**	**7 808**	**11 108**	**14 038**
Rapport .	—	100	181,4	266,5	100	142,3	179,8

Ces chiffres montrent que *c'est la tourbe non modifiée qui laisse passer le moins d'eau ; il s'en écoule bien plus sous la tourbe dont les couches supérieures sont mêlées de sable et bien plus encore sous la tourbe couverte de sable.*

Quant à l'eau évaporée, elle a été calculée comme il suit :

EAU ÉVAPORÉE EN GRAMMES.

ANNÉES.	PLUIE.	Sol de tourbière à sphaigne.			Sol de tourbière infra-aquatique.		
		non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.	non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.
—	—	—	—	—	—	—	—
1892 . .	27 338	20 555	15 474	11 734	16 057	11 406	8 924
1893 . .	20 286	15 325	12 877	9 526	12 995	11 812	7 935
Moyenne .	23 812	**17 940**	**14 176**	**10 630**	**14 526**	**11 609**	**8 430**
Rapport .	—	100	78,9	59,3	100	79,9	58,0

Nous concluons de là que *c'est la tourbe non modifiée qui évapore le plus, puis vient la tourbe mélangée de sable à la surface, et c'est la tourbe garnie d'une couverture de sable qui lance le moins d'eau dans l'atmosphère.*

Pour discerner les causes des faits qui précèdent, il faut d'abord examiner la faculté d'imbibition des sols. Évidemment celle de la tourbe non modifiée est plus grande que celle de la tourbe mêlée de sable, puisque, dans ce cas, la masse de la tourbe est moindre et que la différence est comblée par du sable à faculté d'imbibition

très faible. De ces tourbes avec sable, celle qui en est couverte emmagasine plus d'eau que celle qui en est mélangée, car la couche de tourbe dans le premier cas est plus épaisse (20 centimètres) que dans le second (10 centimètres) et la différence que ceci provoque dans l'imbibition de tout le sol n'est pas compensée par la plus grande faculté d'imbibition du mélange de sable et tourbe comparé au sable pur. Les chiffres ci-dessous (entre autres), obtenus le 8 septembre 1892 à la suite d'une pluie de 128^{mm},6, montrent que le sol tourbeux mélangé de sable sur les vingt premiers centimètres ne peut absorber autant que la tourbe couverte de 10 centimètres de sable.

	NON COUVERT.	MÊLÉ DE SABLE.	COUVERT DE SABLE.
Sol de tourbière à sphaigne. . . .	6 441	5 401	6 062
Sol de tourbière infra-aquatique . .	6 141	4 938	5 829

Dans ces périodes de grandes pluies, les sols se saturent ; la tourbe non modifiée retient le plus d'eau et la tourbe mêlée de sable le moins, l'autre étant intermédiaire entre ces deux. Mais ce classement se modifie s'il survient une période sèche et surtout favorable à l'évaporation. Alors le taux d'eau de la tourbe non modifiée s'abaisse dans une énorme proportion, parce que c'est elle qui possède le plus grand pouvoir d'évaporation (p. 347). Cette forte diminution dans la provision d'eau fait qu'elle descend fort au-dessous de celle qui reste dans le sol muni d'une couverture de sable. C'est lui qui, dans tous ces cas, est le plus humide, grâce à ce que l'évaporation y est entravée à un degré extraordinaire. Le sable se dessèche très vite par les temps secs et forme à la surface une couche plus ou moins épaisse de sol sec qui atténue énormément l'influence des facteurs de l'évaporation sur les couches humides sous-jacentes (p. 347). Même quand toute la couverture de sable est desséchée, l'humidité reste dans le sol tourbeux, parce qu'elle ne passe pas dans le sable[1]. Dans le sol mélangé de sable, la couche de tourbe sableuse possède une meilleure capillarité et évapore par suite plus d'eau que le sable, tout en restant en dessous de la tourbe pure.

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.,* vol. VIII, 1885, p. 211.

Comme l'eau de drainage n'apparaît que quand le sol est saturé, il n'y a rien d'étonnant à ce que le volume de l'eau de drainage soit inversement proportionnel à celui de l'eau emmagasinée et de l'eau évaporée. Plus sont grandes les facultés d'imbibition et d'évaporation, moins il y a d'eau de drainage et inversement. Aussi est-ce la tourbe pure qui en donne la plus faible quantité. Dans les tourbes mêlées de sable, l'eau emmagasinée et l'eau évaporée ne sont pas vis-à-vis l'une de l'autre dans le même rapport que dans la tourbe non modifiée. Si c'était la première qui dominât, la tourbe mêlée de sable devrait perdre plus d'eau par infiltration que celle qui est couverte de sable. C'est le contraire qui arrive ; d'où l'on doit conclure que c'est l'évaporation qui règle surtout l'infiltration. De ce que la tourbe mêlée de sable évapore beaucoup plus que la tourbe recouverte de sable, il résulte qu'il lui faut une plus forte proportion de pluie pour réhumecter le sol et elle donnera moins d'eau de drainage que la seconde.

Si l'on objecte que, dans ces essais, la couche de sol (30 centimètres) était trop mince pour qu'on pût transporter les résultats à la grande culture, nous répondrons que c'est dans les couches supérieures, où les plantes étendent surtout leurs racines, qu'il importe de connaître les éléments de fertilité et que, en outre, c'est là que se montrent surtout les différences dans le taux d'eau des sols ; les zones profondes sont peu ou pas influencées par les diverses opérations culturales. Ceci est confirmé par M. FLEISCHER qui a établi que, pour les couches inférieures et même moyennes des sols tourbeux diversement traités à la surface, les différences dans les quantités d'eau emmagasinées sont nulles ou peu importantes.

L'étude de l'humidité dans un sol épais de 30 centimètres formé en bas de tourbe et en haut de sable ou de tourbe sableuse ne permet même pas de juger de la valeur des procédés considérés ; car les différences trouvées dans ces conditions ne s'appliquent pas à la couche superficielle, la plus importante pour le premier développement des plantes. Considérons seulement les 10 centimètres de la surface; il est certain, d'après ce que nous avons dit plus haut (p. 349), que la tourbe telle quelle renfermera le plus d'eau ; après

viendra le mélange de sable et tourbe et c'est le sable qui sera le plus sec. Donc, dans cette couche, l'eau est autrement répartie que dans une tranche plus épaisse formée inférieurement de tourbe pure. Outre l'action due à la composition physique de la masse, il faut tenir compte de celle de la couverture du sol.

Pour déterminer la température du sol on se servit de caisses sans fond, de bois, de 1 mètre carré de surface et 42 centimètres de hauteur, remplies de terre sur 40 centimètres et reposant sur un sous-sol de gravier absolument perméable. On lisait la température chaque jour, le matin à 7 heures, le soir à 5 heures sur des thermomètres divisés en dixièmes de degré et dont la boule plongeait à 15, 20, 25 centimètres au-dessous de la surface.

Nous donnons dans le tableau ci-après les moyennes mensuelles obtenues dans un sol de tourbière infra-aquatique.

MOIS (1890).	TEMPÉRATURE de l'air	TEMPÉRATURE DU SOL EN DEGRÉS CENTIGRADES.								
		A 15 CENTIMÈTRES.			A 20 CENTIMÈTRES.			A 25 CENTIMÈTRES.		
		Sol non modifié.	Sol mélangé de sable.	Sol couvert de 10 cent. de sable.	Sol non modifié.	Sol mélangé de sable.	Sol couvert de 10 cent. de sable.	Sol non modifié.	Sol mélangé de sable.	Sol couvert de 10 cent. de sable.
Avril . .	7,21	9,13	9,63	9,27	8,79	9,33	8,59	8,64	8,63	8,18
Mai . . .	13,62	15,32	16,49	16,23	11,62	16,00	11,96	14,03	11,75	14,00
Juin. . .	14,08	16,31	17,37	16,93	15,83	17,01	16,05	15,32	16,28	15,48
Juillet. .	16,38	18,08	18,65	18,59	17,58	18,45	17,60	17,05	18,08	17,00
Août. . .	17,41	19,42	19,59	19,52	19,21	19,55	18,81	18,91	20,12	13,51
Septemb.	12,02	13,67	13,95	13,87	13,55	14,36	13,30	13,43	15,38	13,21
Moyennes	13,32	15,36	15,98	15,77	14,97	15,82	14,92	14,53	15,31	14,43
		OSCILLATIONS MOYENNES DE LA TEMPÉRATURE DU SOL.								
»	»	3,62	8,56	9,86	2,40	5,55	4,63	1,94	2,92	2,29

On voit par ces chiffres que :

1° La température du sol tourbeux pendant la saison de végétation s'élève sensiblement par la couverture ou le mélange de sable et plus par le mélange que par la couverture ;

2° L'influence du sable sur l'échauffement de la tourbe diminue

avec la profondeur et plus dans le cas de la couverture que dans celui du mélange ;

3° Les oscillations de la température sont plus fortes dans la tourbe avec sable que dans la tourbe pure.

Pour l'intelligence de ces lois, considérons d'abord les conditions thermiques des sols étudiés (tourbe et sable).

A cause de sa teinte foncée, le sol tourbeux s'échauffe au soleil plus que le sable blanc, du moins à la surface, mais moins dans les zones profondes, tant à cause de sa plus grande capacité calorifique tenant à sa forte teneur en eau (p. 364) que de sa faible conductibilité. Lors du rayonnement nocturne, la tourbe perd par ces raisons moins de chaleur que le sable, qui se refroidit alors bien plus, parce qu'il possède comparativement une conductibilité beaucoup plus grande et une moindre capacité calorifique. Donc, l'échauffement de la tourbe est moindre que celui du sable pendant le jour et quand la température s'élève, de même que son refroidissement est moindre aussi pendant la nuit et quand la température décroît. Les oscillations de la température du sol sont, par suite, beaucoup plus faibles dans la tourbe que dans le sable.

Quand la tourbe est mélangée de sable, sa faculté d'échauffement, d'après ce qui précède, doit augmenter ainsi que les oscillations de la température du sol. C'est ce qui arrive, en effet, comme les chiffres ci-dessus le montrent nettement.

Il est moins simple d'expliquer les différences d'échauffement entre la tourbe mélangée de sable et celle qui en est simplement couverte.

La couche de sable qui recouvre la tourbe s'échauffe très fort par l'insolation et la haute température de l'air, et cela à cause de sa faible capacité calorifique (puisqu'elle est peu aquifère) et de sa bonne conductibilité ; mais cette température élevée ne profite que peu à la tourbe sous-jacente et jusqu'à une profondeur presque insignifiante, parce que la tourbe conduit mal la chaleur. Dans le sol tourbeux mélangé de sable sur 20 centimètres, l'échauffement est moindre que dans le sable par suite de la faible conductibilité et d'une capacité calorifique un peu plus grande ; mais la chaleur se propage plus profondément, parce que le sable, meilleur conducteur, descend plus bas dans le sol.

Le refroidissement de la couverture de sable en dehors du temps d'insolation et pendant l'abaissement de la température est plus accentué que celui de la tourbe mélangée de sable pour les raisons qui amènent son plus fort échauffement dans les circonstances contraires ; mais il peut ne pas s'étendre aussi profondément que dans la tourbe mélangée de sable, à cause de la faible conductibilité de la tourbe que recouvre le sable.

On voit par là que le sol tourbeux sous la couche de sable, pendant l'insolation et par température croissante, s'échauffe moins fort que la couche correspondante de la tourbe mélangée de sable et que ces rapports s'inversent quand l'insolation cesse et que la température fléchit.

Les extrêmes de température du sol sont donc, dans ce premier cas, plus rapprochés, autrement dit les oscillations sont moindres que dans le second cas. Pour la température moyenne, les chiffres montrent que l'excédent présenté pendant l'insolation et pendant le temps de végétation par le sol mélangé de sable sur celui qui est couvert de sable n'est pas égalé par le refroidissement plus fort qui se fait la nuit par température décroissante, et même qu'il reste contenu entre certaines limites. Ce fait s'explique aisément : par le mélange de sable, une masse plus volumineuse est portée à une plus haute température que par la couverture de sable et il y a plus de chaleur emmagasinée pendant les longs jours de la saison chaude.

Avec la décroissance persistante de la température, le refroidissement l'emporte et le sol devient d'autant plus froid que sa conductibilité est meilleure. Dans ces conditions, la température du sol tourbeux avec sable s'abaisse au-dessous de celle du sol tourbeux non modifié et souvent plus dans la tourbe mélangée de sable que dans celle qui en est couverte, parce que la première conduit la chaleur plus profondément.

D'après ce qui précède, la valeur des procédés d'amélioration proposés pour la culture des sols tourbeux se laisse mesurer, du moins en tant que le taux d'eau des sols et leur température entrent en jeu.

Le procédé par couverture offre, tout d'abord, cette conséquence que la couverture de sable atténue sensiblement les oscillations du taux d'eau des sols tourbeux. Pour les climats secs ce procédé sem-

ble être le meilleur, car le sol est énergiquement protégé contre le desséchement, comme le montrent les résultats de l'expérience de 1893. *Dans les climats humides, par suite de la gêne apportée à l'évaporation, il pourra provoquer l'accumulation d'une quantité d'eau excessive nuisible à la végétation, surtout dans les tourbières à sphaigne,* qui ont une faculté d'imbibition bien plus grande que les tourbières infra-aquatiques.

Le procédé par mélange, qui amène dans tous les cas, on l'a vu, une diminution du taux d'eau dans les couches supérieures de la tourbe, *pourra, de ce chef, entraîner des désavantages pour la végétation dans les climats secs et sera d'autant mieux adapté aux climats humides* auxquels, on le comprend, il convient mieux que le procédé par couverture.

Remarquons, du reste, que les défauts inhérents à l'un ou l'autre procédé lors de certaines conditions climatériques peuvent être corrigés, sinon complètement, du moins dans une large mesure, par un assainissement sagement compris. Les observations faites sur les eaux d'infiltration montrent jusqu'à quel degré l'amélioration est possible. Puisque la couverture de sable provoque une infiltration plus forte que le mélange de sable et tourbe, le niveau de la nappe souterraine doit, toutes choses égales d'ailleurs, s'élever moins haut dans le premier procédé que dans le second, et comme c'est la tourbe non modifiée qui donne le moins d'eau d'infiltration, c'est sous elle que la nappe souterraine atteindra son niveau le plus élevé. C'est ce qui arrive en effet, comme le montrent mes observations ci-après se référant à des sols qui étaient assainis jusqu'à 1 mètre de profondeur :

NIVEAU DE LA NAPPE SOUTERRAINE EN CENTIMÈTRES au delà du 0° qui est à 1 mètre de profondeur.

DATES (1894).	Sol de tourbière à sphaigne			Sol de tourbière infra-aquatique		
	non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.	non modifié.	mélangé de sable.	couvert de 10 centim. de sable.
—	—	—	—	—	—	—
15 mai . . .	6,8	10,2	14,3	13,8	15,6	21,2
15 juin . . .	25,3	31,3	38,8	39,7	44,8	50,2
15 juillet. . .	30,3	40,5	56,6	53,0	63,0	70,3
15 août . . .	48,0	64,8	74,7	76,8	91,0	105,2
15 septembre .	49,0	65,6	79,0	70,4	83,7	86,1

On peut donc obvier aux inconvénients qu'entraîne, au point de vue de l'humidité dans certaines circonstances (climat humide ou sec), l'application aux sols tourbeux des diverses méthodes de culture en amenant par l'assainissement, suivant les besoins, le niveau de la nappe souterraine entre certaines limites; avec la tourbe couverte de sable ce niveau est le plus abaissé; c'est sous la tourbe non modifiée qu'il est le plus élevé; la tourbe mélangée de sable tient le milieu à cet égard.

Du reste, on peut parer à l'inconvénient qu'offre le procédé par mélange sous les climats secs en employant comme amendements des matières qui ont une plus grande faculté d'imbibition; par exemple, de la marne, du lehm ou de l'argile. Malheureusement ces matières sont très rares dans les sols des tourbières infra-aquatiques qui seraient surtout indiquées pour ce genre d'amélioration.

En résumé, les divers procédés de mise en culture présentent des différences importantes pour l'humidité du sol, différences qui peuvent être compensées par certaines dispositions, si bien qu'à ce point de vue ils se valent à peu près.

Sous le rapport de la chaleur, le procédé par mélange est nettement supérieur au procédé par couverture; l'échauffement y est meilleur. *Les deux ont sensiblement la même valeur en ce qui concerne les gelées printanières.* Comme on l'a montré plus haut (p. 372), l'aptitude des couches supérieures de la tourbe à se refroidir tient surtout à sa mauvaise conductibilité; celle-ci s'améliorant par le sable, soit en couverture, soit, plus encore, en mélange, il en résulte, sans plus, une atténuation sérieuse du danger des gelées.

Si l'on examine maintenant les autres influences qu'exercent ces deux procédés sur la fertilité des sols tourbeux, on voit que, sous certains rapports, ils se valent et, sous d'autres, le procédé par couverture est le moins bon. *Ainsi par les deux on obvie avec le même succès aux changements de volume excessifs et à l'état trop poreux de la tourbe.* Mais le procédé par couverture est inférieur au procédé par mélange au point de vue de la croissance des plantes dans la jeunesse, de l'influence sur l'érémacausis et de la part de production qui revient au travail mécanique du sol.

A la germination l'humidité fait souvent défaut aux plantes dans

le sable en couverture par les temps secs; par les temps humides ce sont les matières nutritives nécessaires pour une végétation luxuriante qui manquent, même si le sol a reçu une riche fumure. Ceci se comprend si l'on considère que, dès la cessation des pluies, le sable perd de grandes quantités d'eau, et que, d'autre part, sa grande perméabilité et son faible pouvoir absorbant pour les principes nutritifs l'exposent à subir de grandes pertes d'engrais par les temps humides. On sait que les jeunes plantes se développent lentement et faiblement dans le sable tant qu'il ne s'y est pas accumulé une assez forte provision de matières organiques; elles ne végètent vigoureusement que quand leurs racines ont pénétré dans la tourbe sous-jacente. Mais plus tard, si les circonstances extérieures sont favorables, elles peuvent regagner ce qu'elles avaient perdu dans leur jeunesse. Avec des températures extrêmes certains végétaux n'arrivent pas à se développer dans la couche de sable, comme il est arrivé au printemps de 1892 avec mes essais de colza d'été. Les plantes levèrent, puis périrent par persistance de la sécheresse.

La tourbe dont la surface est mélangée avec du sable offre de bien meilleures conditions pour un développement normal, en ce sens que la superficie est d'abord plus riche en eau, puisque sa faculté d'imbibition est plus élevée, mais aussi en principes nutritifs parce que les particules d'humus mêlées au sable ont un fort pouvoir absorbant pour ces principes qui ne sont plus exposés à être dissous comme dans le sable. La végétation initiale des plantes dans la tourbe mêlée de sable est, par suite, meilleure que dans la tourbe couverte de sable, comme cela se voit aisément à l'œil nu. Elles sont bien mieux protégées contre la sécheresse persistante; dans l'essai en question le colza d'été a pu, par ce procédé, surmonter la période de sécheresse.

Le procédé par couverture de sable a encore des inconvénients; cette couverture empêche presque complètement l'air d'arriver à la tourbe sous-jacente, d'autant plus que celle-ci est encore comprimée par le poids du sable. Dans ces conditions l'érémacausie est fort entravée, la tourbe étant en même temps imprégnée d'eau. Cet argument est surtout de poids pour les tourbières à sphaigne qui possèdent une très faible aptitude à la décomposition et une grande

faculté d'imbibition. A ce point de vue, le procédé en question n'est pas applicable à ces sortes de tourbières.

Sous ces derniers rapports aussi, le procédé par mélange présente sur l'autre de grands avantages qui sautent aux yeux ; les particules d'humus étant bien mieux en contact avec l'air, se décomposent plus vite, parce que d'abord elles sont mélangées à du sable perméable, et qu'ensuite les couches supérieures du sol sont ameublies jusqu'à une assez grande profondeur.

Ce dernier argument est celui qui, on ne peut le nier, parle le plus en faveur du procédé par mélange, parce que, abstraction faite des avantages inhérents au labour profond, le mélange de deux sols dont chacun agit défavorablement par plusieurs côtés sur la végétation et la neutralisation désirables de leurs propriétés opposées, peuvent être obtenus de la manière la plus parfaite par une culture profonde.

Si l'on peut opposer à ce que nous disons que le procédé Rimpau (par couverture) a donné des résultats excellents et soutenus, il ne faut pas oublier qu'en admettant qu'il n'y ait pas d'avantage quant au poids des récoltes, le procédé par mélange l'emporterait au point de vue de la certitude des récoltes. C'est ce que confirment non seulement des expériences dans les tourbières hollandaises et divers résultats de M. Fleischer, mais encore mes observations qui prouvent que, du moins sous le climat du plateau bavarois, on obtient de plus hauts rendements par le sable en mélange que par le sable en couverture. Enfin, quant à l'objection, maintes fois soulevée contre la convenance de ce procédé, que le sable pénètre dans les couches profondes de la tourbe, on peut affirmer au contraire que ce fait (qui ne se passe que lentement et aussi du reste dans la tourbe couverte de sable) est avantageux plutôt que nuisible, parce que des couches de plus en plus profondes du sol deviennent perméables.

Un sable à gros grain sans mauvaises herbes paraît le plus propre à l'amélioration du sol tourbeux, parce qu'il oppose le moins d'obstacle à la perméabilité si nécessaire, ce qui importe surtout dans le procédé Rimpau. Du sable à petit grain ne conviendrait point, parce qu'il serait trop facilement enlevé par le vent. D'autres matériaux à

grain fin, tels que le calcaire des tourbières, la marne, le lehm, l'argile, ne sont pas utilisables à cause de leur faible perméabilité ; mais ils peuvent être avantageusement employés en mélange avec la tourbe.

Si le sable renferme du sulfure de fer, on pourra néanmoins l'employer, à moins que la dose de pyrite ne soit trop forte. Il se forme, au contact de l'air, de l'acide sulfurique et du sulfate de fer qui se détruisent par l'addition de chaux ou de marne très calcaire des tourbières en donnant du sulfate de chaux et de l'oxyde de fer inoffensif.

Le sable peut ne pas provenir uniquement du sous-sol de la tourbière ; il peut être apporté du voisinage. En ce cas, l'emploi de petits chemins de fer portatifs semble commandé ; ils permettent d'étendre les améliorations à des tourbières qui, à cause de l'extrême épaisseur de leur couche de tourbe, ne pourraient être traitées par les procédés ordinaires[1]. En tout cas, il faut, pour l'application de cette culture scientifique, certaines conditions. D'abord, la couche de tourbe ne doit pas dépasser $1^m,5$; avec une plus forte épaisseur il serait trop coûteux de fouiller jusqu'au sous-sol pour le ramener à la surface, excepté s'il s'agit des bords des tourbières, où l'on peut apporter de la terre du voisinage. C'est avec une épaisseur de tourbe de $0^m,4$ et au-dessous que l'on peut le plus convenablement opérer avec des fossés. Il faut aussi tenir compte de la composition de la tourbe. Il n'y a guère que les tourbières infra-aquatiques qui puissent être traitées par le procédé en couverture, parce qu'elles ont une plus grande aptitude à la décomposition que les tourbières à sphaigne. Celles-ci ne peuvent voir s'améliorer sûrement leurs propriétés physiques que par leur mélange avec des terres minérales.

Il faut aussi tenir compte des conditions économiques. Là où les produits se vendent mal, où les salaires sont élevés, on devra se demander si les capitaux seront rémunérés. Les circonstances sont plus favorables dans la culture des tourbières exploitées pour la tourbe (*Veencultur*) où, comme on sait, la tourbe est enlevée et la couche

---

1. Pour les détails relatifs à ces deux procédés, il faut se reporter aux ouvrages spéciaux : E. et K. BIRNBAUM, *Die Torf-Industrie und die Moorkultur*, Braunschweig, 1880 ; Fr. KREY, *Die Moorkultur*, Berlin, 1885, etc.

supérieure fibreuse mise de côté est mélangée au sable du dessous. Dans ce cas, la vente de la tourbe compense les frais de mise en culture.

Mais partout où les prix des produits agricoles sont trop bas, les frais sont généralement plus élevés que les bénéfices, si bien qu'on renonce avec raison à l'emploi des procédés soit par couverture, soit par mélange. Maintenant surtout, en raison du bas prix des denrées, des entreprises agricoles coûteuses ne paient plus leur rente.

Si, par suite de la mauvaise composition de la tourbe ou pour les autres raisons susindiquées, les procédés en question ne sont pas applicables, doit-on renoncer à toute autre culture des tourbières? Non, attendu qu'on peut aussi, sans avoir recours au mélange avec du sable, obtenir de ces sols des récoltes qui paient les frais de culture. En beaucoup de contrées où il se produit des dommages par les changements de volume du sol et où l'on doit renoncer à augmenter la compacité par l'addition d'éléments minéraux, on peut néanmoins obtenir des récoltes rémunératrices par un traitement approprié et une exploitation rationnelle.

On commencera tout d'abord par dessécher le sol non suivant un mode uniforme, comme on fait d'habitude, mais en ayant égard aux exigences des plantes en eau et aux conditions climatériques. Ensuite il faut détruire tous les végétaux un peu élevés, ce qui se fait le plus simplement par le feu. On laboure en munissant les pieds des animaux de trait de sortes de raquettes (*Moorschuhe*), si la tourbe est trop molle. Il faut travailler le sol jusqu'à ce que la tourbe soit réduite en fragments d'une certaine dimension ; on emploie pour cela des extirpateurs et des herses tranchantes en évitant d'amener le desséchement de la couche superficielle. Dès que ce desséchement commence à se produire, il faut aussitôt passer le rouleau pour diminuer autant que possible la surface d'évaporation et augmenter la capillarité. Quand on a fourni au sol, sous forme d'engrais artificiel, les principes nutritifs dont il a besoin et qu'on lui a confié la semence, on le roule enfin avec un lourd rouleau.

Cette énergique compression du sol réduit en menus fragments a la plus heureuse influence sur sa fertilité. L'eau est ainsi attirée

des couches profondes vers la surface, ce qui prévient le dessèchement, surtout au printemps. On évite du même coup les dommages de la gelée qui, on l'a vu (p. 373), se font surtout sentir quand la surface de la tourbière est desséchée. En outre, grâce au rouleau, la conductibilité et la capacité calorifique du sol sont augmentées, puisque les grumeaux sont plus rapprochés et que la provision d'eau est plus grande. L'eau fournie aux couches supérieures par celles du dessous est utile à la végétation. Les changements de volume ne sont d'ailleurs pas détruits par le roulage ; mais ils sont d'importance secondaire dans des climats où la distribution des pluies est régulière et où la neige forme l'hiver une couche épaisse. La compacité du sol n'est que faiblement augmentée par l'emploi du rouleau, si bien que pour le défruitement l'emploi des chemins de fer portatifs est nécessaire.

Les essais faits en grand sur diverses tourbières du sud de la Bavière, ainsi que mes derniers résultats dont je vais citer quelques-uns, montrent la convenance de ce procédé, du moins dans les climats humides. Les cases d'expérience avaient un mètre carré de surface et 0m,40 de profondeur, et la tourbe reposait sur un sous-sol très perméable.

MODE de culture.	1892.		1893.		1894.					
	SEIGLE D'ÉTÉ.		COLZA D'ÉTÉ.		SEIGLE D'HIVER.		CAMELINE.		POIS.	
	Grain.	Paille.	Grain.	Paille.	Grain.	Paille.	Grain.	Paille.	Grain.	Paille.
	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.	Gr.
Tourbe de sphaigne.										
Sol tel quel	427,0	870	103,9	850	234,5	720	159,6	595	348,0	670
Sol mélangé avec du sable .	423,5	850	104,2	645	218,9	640	85,8	322	341,1	545
Sol couvert de sable	373,5	760	89,3	580	194,6	540	65,7	213	307,8	435
Tourbe infra-aquatique.										
Sol tel quel	605,3	1050	348,0	670	318,0	970	156,6	553	»	»
Sol mélangé avec du sable .	529,0	890	344,1	545	271,7	850	139,8	417	»	»
Sol couvert de sable	501,5	920	307,8	435	220,0	740	108,7	330	»	»

Ces chiffres montrent que, sur un sol non mélangé de sable, avec des engrais appropriés et des manipulations convenables, on obtient

des produits même plus élevés que sur la tourbe avec sable. On avait répandu des superphosphates, des nitrates et de la kaïnite (chlorure de potassium). Voilà la preuve que les tourbières peuvent porter divers produits agricoles sans l'adjonction de sols minéraux.

Le sol tourbeux, amélioré dans ses propriétés physiques, exige, à cause de sa pauvreté en principes assimilables, une fumure qui doit s'adapter naturellement à sa composition chimique. Les tourbières infra-aquatiques se décomposent plus vite et sont plus riches; aussi renferment-elles d'ordinaire une provision d'azote pleinement suffisante pour une végétation vigoureuse.

Une fumure azotée ne semble indiquée que dans le cas où la tourbe est recouverte de sable, parce que, tant que les plantes sont dans le sable, elles souffriraient du manque d'aliments azotés. Après quelques années, il s'est formé à la surface du sable une couche suffisante d'humus provenant des récoltes précédentes, laquelle permet généralement de laisser de côté la fumure azotée. Dans des cas exceptionnels il faut ajouter de la potasse qui, sur la tourbe pure, se met sous forme de kaïnite ou de carnallite, ou aussi de chlorure de potassium sur la tourbe améliorée par des mélanges minéraux. En outre, une fumure phosphatée est nécessaire dans la plupart des cas; ce sont les scories de déphosphoration (*Thomas*) qui conviennent le mieux. Leur phosphate de chaux se décompose sous l'influence de l'humus et l'acide phosphorique passe peu à peu à l'état assimilable. Ce phosphate a même souvent un meilleur effet que le superphosphate, plus cher, qui ne semble approprié qu'aux sols tourbeux couverts d'une couche de sable. En tout cas il est bon de déterminer dans des champs d'expérience si le phosphate est ou non nécessaire; il pourrait être superflu. Les fumures de potasse (400-1 000 kilogr. de kaïnite par hectare) et, éventuellement, d'acide phosphorique (200-600 kilogr. de phosphate *Thomas* en poudre) doivent être apportées chaque année et aussi tôt que possible dans l'année, même déjà à l'automne pour les cultures de printemps. On les enterre à la charrue ou à la herse.

Sur les tourbières à sphaigne où la tourbe se décompose avec une lenteur extrême, où les principes nutritifs sont en quantité insuffisante, il faut apporter non seulement de la potasse et de l'acide

phosphorique, mais encore de la chaux et de l'azote. Il y a de ce chef un supplément de dépenses qui, en général, n'est pas en proportion avec les récoltes obtenues. Si l'on ajoute que l'état physique du sol de ces tourbières est beaucoup moins favorable à la végétation que celui des tourbières infra-aquatiques, on peut se demander si l'on doit s'occuper d'une amélioration quelconque d'un tel sol. En fait, on renoncera très légitimement dans la plupart des cas à la culture des tourbières à sphaigne, parce qu'elle n'est pas rémunératrice. On les utilisera mieux en exploitant les couches superficielles comme litière et les couches profondes comme combustible (p. 378).

Quand les circonstances permettent à l'agriculture de s'exercer sur les tourbières à sphaigne, on emploie, outre la potasse et l'acide phosphorique, les engrais déjà indiqués pour les tourbières infra-aquatiques. On donne la chaux sous forme de chaux caustique (5 000-10 000 kilogr. par hectare) ou de marne. Il semble préférable de chauler peu et souvent que de faire un fort et unique chaulage. La fumure azotée sera soit du nitrate de soude, soit des composts et du fumier de ferme. Le fumier frais est mauvais, parce qu'il augmente la perméabilité de la tourbe.

Dans la culture des marais, en Hollande, on emploie comme fumure aussi bien des boues de ville que des limons de mer. Les premières sont un mélange du contenu des égouts et de déchets de cuisine, cendres, boues de rues, etc. Cet engrais, récolté et mis en tas par les villes elles-mêmes, est acheté au poids aux enchères par les colonistes. Le limon qui se dépose en vase fine à l'embouchure des fleuves, et qu'on récolte par draguage, a aussi une action physique et une action chimique sur le sol. Sous ce dernier rapport, il vient après les boues de ville ; sous le premier, il leur est égal. Mais comme, à cause de son moindre prix, il est employé en plus grande quantité, il mérite la préférence sur les boues de ville pour l'amélioration des propriétés physiques du sol.

Une manière de fumer le sol, très répandue dans les tourbières du nord de l'Allemagne et dont nous allons dire quelques mots pour compléter le sujet, consiste dans la *combustion d'une partie de la matière organique,* combustion qui fait passer à l'état assimilable

les principes minéraux qu'elle renferme. Souvent on répète cette pratique jnsqu'à épuisement du sol.

Pour appliquer ce procédé[1] on assèche d'abord la tourbière en creusant un fossé principal de 1m,25 à 1m,50 de profondeur dans lequel débouchent, à angle droit et à 24-30 mètres de distance, d'autres fossés ayant 90 centimètres de profondeur et 1m,30 de largeur et alimentés à leur tour par de plus petites rigoles de troisième ordre, éloignées de 6 mètres, profondes de 40 à 60 centimètres et larges d'autant. La terre extraite des fossés est également répartie sur le sol, puis on le cultive à la bèche ou à la houe. Il passe tout l'hiver à cet état et, quand le temps est favorable, on met le feu comme nous l'avons indiqué. On sème le sarrasin dans les cendres encore chaudes et on enterre la graine avec une herse faite d'un fagot d'épines.

Quand un champ a été ainsi écobué, on peut recommencer au bout de 3, 4 ou 5 ans et continuer tant que la tourbe remuée à la houe se laisse brûler. Cela devient finalement impossible, parce qu'il se forme à la surface une croûte dure qui ne se laisse plus ameublir et brûler. La fertilité, que les récoltes amoindrissent et qu'aucune fumure n'entretient, diminue à tel point, après ces combustions répétées, qu'il n'y a plus avantage à continuer l'opération. Le sol épuisé doit subir une jachère de 30 à 40 ans avant qu'il se forme une nouvelle couche propre à l'écobuage.

Dans les tourbières basses dont la tourbe n'a qu'une faible combustibilité, dans les stations humides, et là où pénètrent les bêtes de trait on emploie aussi le procédé qui consiste à découper des plaques de tourbe à l'aide d'instruments spéciaux et à les disposer en tas que l'on allume.

La combustion présente divers avantages. Par le feu l'humus est détruit et donne des cendres qui, mélangées au sol, améliorent ses propriétés physiques et chimiques. En outre, des éléments nuisibles tels que le protoxyde de fer perdent leur nocuité en se transformant en oxyde au maximum. Ces actions bienfaisantes se limitent à

---

1. E. Birnbaum, *Ueber das Moorbrennen und die Wege zu seiner Beseitigung*, Glogau, 1873.

la couche en contact avec le feu et à celle qui est mélangée aux produits de la combustion. Les couches inférieures gardent leur état primitif désavantageux. Dès que les matières nutritives devenues solubles ont été absorbées par les plantes, le sol reprend son infertilité.

Ce qui démontre le mieux les inconvénients de cette méthode, c'est l'état misérable des cultivateurs qui la pratiquent. Même dans les années ordinaires ils ne peuvent qu'à grand'peine soutenir leur existence ; quand elles sont mauvaises, ce qui arrive souvent, ils en sont réduits à s'adresser aux pays voisins. Aussi a-t-on déjà souvent agité la question de l'interdiction de l'écobuage dans les tourbières, sauf à occuper leurs colons d'une autre façon ou à les indemniser. Ce qui pousserait surtout à cette résolution, ce serait le fait que la fumée de la tourbe est nuisible au climat et à la végétation[1]. Cependant tout ce qui a été dit à ce sujet n'est pas inattaquable ; il y a, au contraire, des raisons de croire que, dans certaines conditions, cette fumée peut être utile aux végétaux cultivés. On ne peut lui attribuer de nocuité que parce qu'elle est gênante pour l'homme et les animaux.

Il en est autrement si l'on se place au point de vue agricole. La culture après combustion est, il est vrai, un mode préparatoire de culture avantageux à plusieurs égards pour la fertilisation ; mais c'est une culture vampire[2], car elle consomme le peu de force productive du sol sans lui rendre par des fumures les principes enlevés par les récoltes ; à chaque combustion le sol devient plus pauvre, les rendements diminuent jusqu'à épuisement complet et stérilité. Alors il faut s'installer sur d'autres cantons pour les traiter de même. Quand ceux-ci sont trop éloignés des habitations, les colons sont obligés de les quitter pour s'en construire d'autres à proximité de leurs terrains de culture.

De plus, les récoltes sont incertaines, parce qu'on ne cultive guère que le sarrasin (plus rarement le seigle, l'avoine, les pommes de terre, les betteraves) et que les récoltes de sarrasin sont facilement

1. M. A. F. Prestele, *Ueber das Moorbrennen in Ostfriesland, den Morrauch, die weite Verbreitung desletzeren in Europa, etc.*, Göttingen, 1868. — W. von Laer, *Der Morrauch und seine Beseitigung*, Münster, 1871.

2. E. Birnbaum, *loc. cit.*, p. 43.

endommagées. Le bien-être des colons dépend donc de la réussite — très chanceuse — du sarrasin. Comme il n'y a pas de fourrage, on ne peut pratiquer l'élevage, qui est la base de l'agriculture, et l'on est privé de tous les avantages qui résultent de l'union de l'agriculture et de l'éducation du bétail.

Le feu s'avance souvent plus loin qu'on ne le veut ou bien il est éteint par une pluie persistante, si bien que la combustion est incomplète, la semaille entravée, impossible même parfois, et que l'on a travaillé pour rien.

La culture des tourbières par combustion doit être rejetée sans hésitation, non seulement parce qu'elle ne donne qu'un rendement faible et très incertain, qu'elle épuise le sol, qu'elle est incompatible avec une exploitation fructueuse prolongée et qu'elle ruine le pays, mais encore parce qu'elle exerce, au point de vue moral, une influence pernicieuse. La monotonie du système de culture, l'oisiveté temporaire qui en résulte, l'insuffisance d'occupations, surtout pendant l'hiver où toutes les relations sont interrompues parce que les tourbières sont impraticables, enfin la difficulté d'améliorer sa situation, tout contribue à enfoncer l'homme dans la paresse et l'indifférence. Ajoutons encore la mauvaise nourriture, le manque de viande et l'excès d'aliments non azotés. C'est à cela que tient en grande partie le manque d'activité et d'énergie des habitants des tourbières.

Les inconvénients de la culture des tourbières gisent donc moins dans le désagrément ou la nocuité douteuse de la fumée que dans les conditions désavantageuses économiques et morales où se trouve la population. Elles suffiraient seules à justifier l'abandon de ce procédé. La question d'une autre culture rationnelle des tourbières ou d'emplois ou d'indemnités à donner à ceux qui les cultivent est si peu avancée, que le procédé par écobuage durera longtemps encore. Il ne pourra être délaissé que quand on aura créé les ressources suffisantes pour une meilleure exploitation.

Pour apprécier le rendement des autres méthodes de culture dont il a été question, il faut tenir compte de certains côtés, tels que l'organisation de l'exploitation et le choix des végétaux cultivés. Dans les tourbières améliorées par des sols minéraux et une fumure ra-

tionnelle, on peut cultiver toutes les plantes adaptées au climat [1]. Sur les autres, traitées seulement par la fumure et les opérations culturales, il faudra faire un bon choix des végétaux à cultiver en tenant compte du climat.

Évidemment, sur de tels sols pauvres en principes nutritifs assimilables, il sera indiqué d'adopter un assolement aussi peu exigeant que possible, dans lequel devra dominer la culture herbagère associée à l'élevage du bétail. Ce sera d'autant plus avantageux que la culture des plantes fourragères sur les terrains tourbeux procure dans les récoltes une plus grande garantie que celle des autres plantes cultivées. Les espèces qui conviennent le mieux pour créer des prairies sur les sols tourbeux sont : *Phleum pratense, Avena elatior, A. pubescens, Dactylis glomerata, Festuca arundinacea, F. rubra, Poa serotina, Lolium italicum,* en outre *Agrostis vulgaris* (*A. stolonifera*), *Holcus lanatus, Cynosurus cristatus, Poa pratensis, Festuca ovina.* Ces dernières espèces s'introduisent plus tard toutes seules. Parmi les papilionacées il y a surtout à citer : *Medicago lupulina, Lotus corniculatus, L. uliginosus, Trifolium repens, T. pratense, Lathyrus pratensis.*

Les principaux grains qu'on y cultive sont : le seigle, l'*Avena strigosa,* le sarrasin, le pois, la vesce, la féverole, le lupin; parmi les racines il faut citer d'abord la pomme de terre, puis la betterave. La plupart des légumes réussissent très bien si on fume suffisamment, et surtout les légumes-racines.

La culture forestière y offre en général peu de chance de succès ; elle est du reste irrationnelle partout où l'on peut transformer les tourbières en bonnes prairies, en bonnes terres. Il peut cependant y avoir des circonstances où l'on ait à boiser certaines parties. Les essais faits jusqu'ici ne font pas concevoir de grandes espérances. Il est vrai que certaines plantations en chênes, épicéas et pins sylvestres [2] ont bien prospéré au début ; mais leur développement ulté-

---

1. On y a jusqu'alors cultivé de préférence l'avoine, l'orge, le seigle, le colza, la pomme de terre, la betterave, les légumes, le raygrass d'Italie. Le blé même y réussit, mais il souffre souvent de la rouille.

2. K. Brünings. *Der forstliche und der landwirthschaftliche Anbau der Hochmoore mittelst des Brandfruchtbaues,* Berlin, 1881.

rieur a été défectueux, sans doute parce que les racines ont souffert dès qu'elles ont atteint la tourbe profonde acide et pauvre en oxygène.

C'est seulement là où la tourbe n'est pas profonde, où le sol a été desséché à fond que certaines essences peuvent se développer pleinement. Au reste, il faudra faire encore de nombreux essais avant que la question de l'utilisation des tourbières par la culture forestière soit définitivement résolue[1].

Parmi les végétaux ligneux, les saules seuls, semble-t-il, méritent l'attention ; ils ne réussissent bien que sur le sous-sol sablonneux, pas sur la tourbe même. Mais, comme dans beaucoup de tourbières ce sous-sol se présente et que les bords des fossés, avec leur faible épaisseur de tourbe, sont aptes à la plantation, on peut installer des haies de saules plus ou moins étendues. Leur principal avantage est de procurer du travail à de nombreux ouvriers pendant une grande partie de l'année. La coupe des osiers exige assez de force ; mais l'enlèvement et l'écorçage peuvent être confiés à des femmes et des enfants qu'on occupe aussi à nettoyer les oseraies. Si, en outre, cette matière première est mise en œuvre par les habitants des tourbières, ils trouvent là de l'occupation pour l'hiver.

Pour planter une oseraie, on défonce le sol à une profondeur de 40 à 60 centimètres ; on le divise en planches de 4 mètres de large et on enfonce à 45 ou 60 centimètres de distance des boutures de saule viminal ou de saule pourpre ou de leur hybride. La première année on fait une récolte sarclée avec fumure (betteraves ou pommes de terre) qui maintient le sol propre. La seconde année commence l'exploitation qui se répète tous les ans[2].

---

1. D'après certaines observations, il faudrait faire surtout appel aux essences suivantes : chêne, épicéa, aulne, bouleau (*B. pubescens, B. nana, B. humilis*), frêne, peuplier (*P. tremula, P. nigra, P. canadensis*), noyer.

2. J. A. Krahe, *Lehrbuch der rationellen Korbweidencultur,* Aachen, 1884 ; R. Schulze, *Die Korbweide, ihre Cultur, Pflege und Benutzung,* Breslau, 1885 ; F. M. Schulzen, *Korbweidencultur, Lehranstalten für Korbflechterei und die Weiden,* Trier, 1884 ; R. Fischer, *Die Feldholzzucht,* Berlin, 1878 ; A. Delius, *Mittheilungen uber die Cultur der Flecht und Bandweiden. Im Anhang zu : Die Cultur der Wiesen und Grasweiden,* Halle, 1874.

c) Sols forestiers.

Pour ces sols la question capitale est tout d'abord l'*influence de l'enlèvement de la couverture*. Les opinions des spécialistes sont assez divergentes à cet égard et ne peuvent guère être critiquées avec autorité, vu l'insuffisance des expériences. C'est seulement quand on aura les résultats des nombreuses places d'essai installées dans tout l'empire allemand qu'on pourra se faire une idée exacte de cette influence. Jusque-là il faut se contenter d'un jugement approché basé sur les essais actuels.

On ne peut douter, d'après ce que nous avons dit précédemment, de l'influence de la couverture sur le sol (p. 407-445), que l'enlèvement de cette couverture n'exerce une action le plus souvent considérable sur la fertilité du sol et la végétation des arbres, action qui a trait tant à la teneur en principes nutritifs qu'à l'état mécanique du sol, à ses rapports avec l'air, la chaleur, l'humidité, et qui varie de la manière la plus complexe suivant la composition et la situation du sol, suivant la flore, l'âge et la densité du peuplement, etc.

Étant donné que les éléments de la couverture, devenant solubles à mesure qu'elle se détruit, sont amenés dans le sol par les eaux atmosphériques et qu'il n'y a pas d'autre source aussi importante d'alimentation pour les plantes, on peut affirmer *à priori* que *tout enlèvement continu de la couverture appauvrit nécessairement plus ou moins le sol*.

Cette influence sera évidemment différente selon la richesse du sol et le drainage souterrain. Les recherches de A. Stöckhardt [1] et de E. Ramann [2] montrent combien peuvent être grandes les différences à cet égard. Le premier s'est adressé à deux parcelles voisines de même composition et même situation. Le sol était du sable de

1. A. Stöckhardt, *Landw. Versuchsstationen*, vol. VII, 1865, p. 235.

2. E. Ramann, *Die Waldstreu und ihre Bedeutung für Boden und Wald*, Berlin, 1890; *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen*, 1883, 11e et 12e livr., p. 577 et 663. Voir en outre : R. Weber, *Untersuchungen über die agronomische Statik des Waldbaues*, München, 1877. *Inaug. Dissertation*; J. Hanamann, *Vereinschrift des böhmischen Forstvereins*, 1881, p. 48.

bruyère ; l'une des parcelles était peuplée de pins de 50 ans ; l'autre, précédemment garnie de pins de même âge, était nue au moment de la prise d'essai. L'analyse chimique du sol donna par hectare, sur une couche de 47 centimètres, les résultats suivants exprimés en kilogrammes :

	MINÉRAUX solubles dans l'acide chlorhydrique.						MINÉRAUX solubles dans l'eau.	MATIÈRE organique. (Humus.)	AZOTE.	TERRE fine.
	Potasse.	Chaux.	Magnésie.	Silice.	Acide phosphorique.	Acide sulfurique.				
				Sol intact.						
Couverture (50 600 kg.) . .	113	181	126	101	185	72	»	16 970	242	»
Sol (16 millions de kg.) . .	813	451	163	451	682	439	1 300	45 500	2 110	»
Sous-sol (8 mill. de kg.). .	4 550	3 578	975	811	4 550	1 709	3 420	77 200	6 002	»
Total.	5 476	4 210	1 264	1 363	5 417	2 220	4 720	139670	8 354	1 315 000
				Sol ratissé.						
Couverture (9 940 kg.) . .	7	56	28	36	33	8	»	1 718	26	»
Sol (16 millions de kg.) . .	553	521	65	780	569	260	585	16 420	1 073	»
Sous-sol (8 mill. de kg.). .	3 250	2 280	244	650	4 230	1 380	2 280	42 300	3 660	»
Total.	3 810	2 857	337	1 466	4 832	1 618	2 865	60 438	4 759	576 000
				Excédent du sol intact.						
Pour la couverture. . . .	106	125	98	65	152	64	»	15 252	216	»
Pour le sol.	260	— 70	98	— 329	113	179	715	29 080	1 037	»
Pour le sous-sol	1 300	1 298	731	161	320	329	1 140	34 900	2 342	»
Total.	1 666	1 353	927	— 103	585	572	1 855	79 232	3 595	739 000

Il ressort de ces chiffres que le sol forestier subit par l'enlèvement de la couverture une diminution notable en aliments minéraux solubles, en matières organiques et azotées et en éléments fins. La faculté d'imbibition du sol intact est aussi plus grande que celle du sol ratissé en raison du taux plus élevé d'humus et de terre fine.

E. Ramann a fait des expériences sur un sol de sable diluvien garni de pins ayant un très faible accroissement.

La parcelle ratissée était privée chaque année de sa couverture depuis 16 ans. Les éléments calculés en kilogrammes pour une surface

d'un hectare sur 1m,50 d'épaisseur sont réunis dans le tableau ci-dessous :

ÉLÉMENTS.	SOLUBLE DANS l'acide chlorhydrique.			TAUX EN ÉLÉMENTS solubles et insolubles.			TAUX dans la couverture enlevée.	LA COUVERTURE contient en moins ou en plus que le sol ratissé.
	Sol intact.	Sol ratissé.	Le sol ratissé contient + ou —	Sol intact.	Sol ratissé.	Le sol ratissé contient + ou —		
Potasse	1 622	589	— 1 033	23 010	16 380	— 6 660	21	— 6 639
Soude	1 919	418	— 1 501	10 125	8 325	— 1 800	6	— 1 794
Chaux	853	551	— 302	4 747	4 117	— 630	107	— 523
Magnésie	992	778	— 214	1 462	1 372	— 90	16	— 74
Oxyde de fer	7 299	5 017	— 2 282	13 275	5 130	— 8 145	43	— 8 102
Alumine	11 131	9 967	— 1 164	73 372	66 307	— 7 065	75	— 6 990
Protoxyde de fer et alumine	18 430	14 984	— 3 446	86 647	71 437	— 15 210	»	»
Sesquioxyde de manganèse	558	402	— 156	2 025	765	— 1 260	24	— 1 236
Acide phosphorique	850	898	+ 48	2 340	1 102	— 1 238	44	— 1 194
Acide sulfurique	180	49	— 131	»	»	»	4	— 127
Silice	14 830	12 647	— 2 183	»	»	»	168	— 2 015
Total soluble dans l'acide chlorhydrique	41 267	34 735	— 6 352	»	»	»	»	»
Azote	»	»	»	540	472	— 68	287	+ 219

On voit que l'enlèvement de la couverture amène une perte importante en éléments minéraux solubles. Même l'alumine, d'ordinaire si résistante, a beaucoup diminué. Quelques substances, telles que l'acide phosphorique, ont subi une perte dans l'ensemble, mais une partie a passé de l'état insoluble à l'état soluble. Un coup d'œil jeté sur les trois dernières colonnes montre que la perte subie par le sol dépasse de beaucoup la quantité de matières minérales enlevées avec la couverture, quantité réellement insignifiante vis-à-vis du taux du sol. On en conclut que ce n'est pas l'enlèvement de la couverture qui amène l'appauvrissement du sol ratissé ; ce sont d'autres causes, parmi lesquelles on doit tout d'abord signaler la désagrégation plus rapide et la lixiviation plus forte dans le sol privé de sa couverture.

Les précédents essais et divers autres prouvent d'une manière éclatante que *les sols légers, pauvres, sont fortement atteints dans leur fertilité par l'enlèvement régulier de la couverture.*

Sur les sols argileux, compacts, riches en principes nutritifs, comme les sols de lehm ou d'argile, les pertes causées par le ratis-

sage de la couverture sont incomparablement moindres que sur les sols sablonneux. C'est ce que montrent quelques résultats obtenus par A. Stöckhardt [1] et E. Ramann [2].

Voici les chiffres trouvés par Stöckhardt pour un sol de lehm : 100 000 parties de sol renferment en éléments solubles dans l'acide chlorhydrique :

		Potasse.	Chaux.	Magnésie.	Acide phosphorique.	Acide sulfurique.	Éléments fins en p. 100 du sol.
Surface . . .	Du sol intact.	152	67	22	166	61	56,5
	Du sol ratissé.	144	62	18	159	75	54,5
Sous-sol . . .	Du sol intact.	110	65	25	140	60	50,1
	Du sol ratissé.	92	59	26	140	58	48,4
Sol et sous-sol.	Sol intact . .	262	132	47	306	121	53,3
	Sol ratissé. .	236	121	44	299	133	51,5

L'impression que produisent ces chiffres est tout autre que s'il s'agissait de sols sablonneux ; la différence entre le sol intact et le sol ratissé est infiniment moindre que dans le sable, toutes circonstances égales ; elle est même si faible, qu'on peut à peine en tenir compte.

E. Ramann, opérant sur un sol provenant de l'altération superficielle d'une marne diluvienne reposant sur du lehm et du sable lehmeux et peuplé de pins de 40 ans, obtint des résultats analogues. Il fit deux essais ; le premier donna pour le sol la comparaison suivante :

Éléments.	Sol intact.		Sol ratissé chaque année depuis 20 ans.	
	Sol 35 centim. de lehm.	Sous-sol 65 centim. de lehm.	Sol 20 centim. de lehm.	Sous-sol 80 centim. de lehm.
Potasse	2,36	1,74	0,80	2,62
Soude	0,61	0,34	0,26	0,15
Chaux	2,11	11,07	2,36	13,82
Magnésie.	0,82	1,20	0,73	0,79
Oxyde de fer	4,45	5,58	5,44	5,04
Alumine	7,12	5,41	7,65	5,38
Acide phosphorique.	0,19	0,156	0,21	0,16
Acide sulfurique	0,018	0,015	0,018	0,019
Silice soluble dans les alcalis. . .	7,91	7,49	8,44	9,89

1. A. Stöckhardt, *Tharand, Jahrbuch,* vol. 9, 1864, p. 280.

2. E. Ramann, *Die Waldstreu, etc.,* p. 83. Voir aussi : Councler, *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen,* 1885, p. 121.

A l'exception de la potasse qui paraît exister dans ces sols en quantité très variable, les analyses répondent aux prévisions. L'analyse de la surface intacte y montre une plus forte désagrégation (35 centimètres de lehm contre 20 centimètres pour le sol ratissé) et en relation avec ce fait, un taux moindre de principes minéraux, notamment de chaux facilement soluble, tandis que la dose d'acide sulfurique reste absolument la même.

Le second essai a montré exactement les mêmes rapports, comme l'indiquent les chiffres suivants :

	SOL INTACT.						SOL RATISSÉ CHAQUE ANNÉE.					
	Sol 70 centim. de sable lehmeux.			Sous-sol 30 centim. de lehm.			Sol 53 centim. de sable lehmeux.			Sous-sol 47 centim. de lehm.		
	Soluble dans H Cl.	Résidu insoluble.	Total.	Soluble dans H Cl.	Résidu insoluble.	Total.	Soluble dans H Cl.	Résidu insoluble.	Total.	Soluble dans H Cl.	Résidu insoluble.	Total.
Potasse	0,11	1,73	1,84	0,17	1,94	2,11	0,07	0,90	0,97	0,31	0,80	1,14
Soude	0,03	0,68	0,71	0,01	0,48	0,52	0,08	0,27	0,35	0,03	0,38	0,41
Chaux.	0,54	0,63	1,17	1,89	0,64	2,53	0,64	0,28	0,92	2,02	0,93	2,95
Magnésie	0,11	0,18	0,29	0,37	0,24	0,61	0,25	0,05	0,30	0,66	0,24	0,90
Oxyde de fer.	1,53	0,97	2,50	2,33	0,98	3,31	1,69	0,88	2,57	4,40	0,89	5,29
Alumine.	0,95	4,85	5,80	1,41	5,82	7,23	1,07	4,68	5,75	2,01	5,57	7,58
Acide phosphorique .	0,18	0,05	0,23	0,11	0,03	0,14	0,08	0,10	0,18	0,11	0,06	0,17
Acide sulfurique . . .	0,012	»	»	0,012	»	»	0,014	»	»	0,012	»	»
Silice soluble.	»	7,49	»	»	5,13	»	»	3,35	»	»	7,08	»

A l'exception des alcalis qui sont en moindre quantité dans le sol ratissé, il n'y a que de faibles différences entre les deux sols. Le taux en éléments solubles est un peu plus fort dans le sol ratissé, mais le taux total est sensiblement le même. Donc *l'enlèvement de la couverture pendant vingt ans n'a pas amené de modification importante dans la composition du sol.* Si cette pratique a une bien moindre influence dans les sols de lehm que dans les sols sablonneux, cela tient, d'une part, à la richesse beaucoup plus grande des premiers en principes minéraux et, de l'autre, à leur moindre perméabilité.

Considérons maintenant son action sur l'arrangement des particules du sol, arrangement qui se mesure par le volume des pores. Ce volume s'amoindrit dans les pineraies pauvres par l'enlèvement

prolongé de la couverture, tandis qu'on ne constate pas de modification sur les bons sols[1].

Quant à la teneur en eau des sols, les recherches de E. Ramann[2] montrent que le sol non ratissé n'est plus humide qu'à la surface ; au-dessous (de 25 à 80 centimètres) il est au contraire plus sec que le sol ratissé. Ce savant explique ces différences par la pénétration plus facile de l'eau dans le sol ratissé et par sa moindre évaporation.

Cette dernière opinion ne semble cependant pas justifiée par ce fait que, s'il se forme sur le sol ratissé une couche mince de feuilles tombées, l'évaporation y est plus forte que sur un sol garni de mousse (p. 438). Le moindre taux d'eau du sol non ratissé peut bien plutôt être attribué, en dehors de la pénétration plus difficile des petites pluies, à ce que, par le maintien de la couverture, la croissance des arbres est activée et par suite leur absorption d'eau (p. 443).

Les chiffres suivants, obtenus par Schwappach[3], montrent que le sol non ratissé, surtout s'il est originairement pauvre en principes nutritifs, provoque un accroissement plus fort que le sol ratissé :

	ACCROISSEMENT EN HAUTEUR.			ACCROISSEMENT EN VOLUME.		
	1856-65	1866-76	1877-86	1856-65	1866-76	1877-86
	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.	centim.
Sol non ratissé.	0,29	0,21	0,15	17,90	8,48	5,65
Sol ratissé chaque année . .	0,27	0,15	0,11	16,43	5,97	4,57

Ces chiffres accusent un ralentissement sérieux de l'accroissement par l'enlèvement de la couverture pendant vingt ans. E. Ebermayer[4] donne les résultats ci-après sur la perte d'accroissement des hêtres dans les stations d'essai bavaroises, lorsqu'on enlève la couverture chaque année :

Triage Gefaell (Rhön). — Massif de hêtre de quatre-vingt dix ans sur sol basaltique; I. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1866 à 1892 = 8.1 p. 100.

1. E. Ramann, *Die Waldstreu, etc.*, p. 65 et 92.

2. E. Ramann, p. 70 et 91.

3. *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen,* 1887, p. 401; E. Ramann, *Die Waldstreu, etc.*, p. 78.

4. E. Ebermayer, *Forstlichnaturwissenschaftliche Zeitschrift,* 1894.

Triage Hundelshausen (Steigerwald). — Massif de cent vingt-cinq ans sur lehm sableux du keuper; II. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1862 à 1892 = **32.2** p. 100.

Triage Höchberg (Würzburg). — Massif de soixante-seize ans sur lehm calcaire du muschelkalk; III. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1861 à 1888 = **38.8** p. 100.

Triage Rothenbuch (Spessart). — Massif de soixante-six ans sur sable lehmeux du grès bigarré; III. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1861 à 1888 = **41.87** p. 100.

Triage Wiesen (Spessart). — Massif de soixante-dix ans sur sable lehmeux du grès bigarré; III. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1862 à 1892 = **55.8** p. 100.

Triage Hain (Spessart). — Massif de cent quarante ans sur sable lehmeux du grès bigarré; classe de fertilité entre III et IV : perte d'accroissement de 1861 à 1888 = **50.32** p. 100.

Triage Hundelshausen. — Massif de quatre-vingt-onze ans sur lehm sableux et pierreux du keuper; IV. Classe de fertilité : perte d'accroissement de 1862 à 1892 = **39.0** p. 100.

L'enlèvement périodique de la couverture a donc eu une influence désastreuse sur l'accroissement du hêtre. Cela est prouvé d'une manière éclatante par les taux précédents, qui montrent encore que le dommage causé est en général d'autant plus grand que le sol est plus pauvre.

Quand, par exemple, les hêtres du Spessart accusent une perte d'accroissement de 40 à 55 p. 100 par suite de l'enlèvement annuel de la litière, ceux du Rhön en sol basaltique très fertile ne subissent qu'un recul de 8 p. 100. Du reste, Ebermayer a montré que l'accroissement ligneux se déprime d'autant plus que la couverture est ratissée plus souvent.

Ainsi, dans le triage de Hain, la perte d'accroissement a été de 50.32 p. 100 en vingt-sept ans sur la parcelle ratissée chaque année, et seulement de 10 p. 100 là où on n'enlevait la couverture que tous les six ans; dans le triage de Rothenbuch, les chiffres furent 41.87 p. 100 et seulement de 13.28 sur le sol ratissé tous les trois ans.

Ces observations et d'autres semblables montrent que *l'effet nuisible de l'enlèvement de la couverture sur la végétation des arbres*

est d'autant plus accusé que le sol est plus pauvre en principes nutritifs et plus perméable et que cette pratique se renouvelle plus souvent.

On peut en déduire qu'il est bon de renoncer à l'enlèvement de la couverture sur tous les sols pauvres, surtout sur les sols sablonneux, tandis qu'il peut se pratiquer sans inconvénient, mais avec modération, sur des sols riches et compacts, le taux des principes nutritifs y étant plusieurs milliers de fois plus grand que dans la couverture. La dissolution des éléments précieux y est moindre aussi que dans les sols de la première catégorie, parce que l'infiltration de l'eau s'y fait à un bien moindre degré.

L'enlèvement d'une plus ou moins grande partie de la couverture apparaît comme une excellente mesure dans tous les cas où elle acquiert une épaisseur excessive, ou bien où elle nuit aux réactions chimiques du sol. Comme on l'a vu plus haut (p. 440), une trop forte couche de mousse nuit au sol en le privant d'une certaine portion des eaux de pluie, laquelle est absorbée par la couverture et renvoyée par l'évaporation dans l'atmosphère.

Suivant les conditions de climat et de sol, l'action nuisible de la couverture se fera déjà sentir dès que son épaisseur dépassera 5-10 centimètres. Si le tapis de mousse est plus épais, il sera toujours avantageux pour la végétation d'enlever l'excédent.

Quant à la composition de la couverture, nous avons prouvé plus haut (p. 427) que le sol par elle se détériorait beaucoup si les détritus se transforment en humus brut. La suppression des accumulations de ce dernier doit fatalement exercer une influence très favorable sur la fertilité du sol forestier ainsi que toutes les mesures par lesquelles on empêche leur formation (p. 276).

L'influence de l'enlèvement de la couverture dépend non seulement de la composition physique et chimique du sol, mais aussi de son épaisseur et de sa situation. Si le sol est superficiel, le dommage sera plus grand et inversement. On devra, d'ailleurs, considérer en même temps la richesse du sol en principes nutritifs. Ainsi, un sol basaltique superficiel souffrira moins du ratissage de la couverture qu'un sol profond de sable quartzeux qui, au bout de peu d'années, accusera le triste effet de cette opération. Elle sera plus admissible

s'il se trouve, à quelque distance, une nappe aquifère qui apporte aux racines, par capillarité, l'eau et les sels nutritifs.

La situation topographique est aussi à considérer. En terrain horizontal ou peu incliné, le ratissage de la couverture n'amènera pas l'entraînement des éléments fins, ce qui arrivera, au contraire, sur les fortes pentes[1]. S'il s'est formé des accumulations d'humus brut qu'il y ait intérêt à enlever, on le fera par larges bandes parallèles aux courbes de niveau.

L'enlèvement de la couverture est moins nuisible sur les pentes humides exposées au nord et à l'ouest que sur les versants sud et est[2]. Les sommets et les pentes exposés aux vents desséchants et incomplètement boisés doivent être particulièrement protégés contre tout enlèvement. En ces points, l'interruption de l'érémacausis par la sécheresse provoque facilement des accumulations d'humus brut. Si elles s'étendent sur de grandes surfaces, il faudra examiner s'il y a lieu de les enlever ou si l'on peut y obvier par des règles de culture. Quant à l'extraction de la couverture qui s'accumule en quantités considérables dans les gorges étroites, il y a d'autant moins à s'en préoccuper qu'une opération de ce genre est plutôt utile que nuisible.

Les exigences des végétaux, exigences variables suivant l'espèce et l'âge, sont aussi à considérer. En général, l'enlèvement de la couverture est moins nuisible à la végétation du résineux frugal qu'à celle du feuillu plus exigeant.

Dans leur période d'active croissance (bois jeunes et moyens), les arbres souffrent bien plus de cette pratique que dans un âge plus avancé. Le maximum d'absorption annuelle varie avec les espèces d'arbres et arrive plus tard sur les sols pauvres que sur les riches. On peut admettre en gros que le pin sylvestre absorbe le plus d'éléments minéraux entre quinze et trente ans, l'épicéa entre trente et cinquante, et le hêtre entre quarante et soixante. Pour le pin sylvestre, par exemple, les différences aux divers âges sont telles que ses exigences à cent ans ne sont même pas la moitié de ce qu'elles

---

1. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. XVIII, 1895, p. 195.
2. E. Wollny, *Forschungen, etc.*, vol. X, 1887, p. 3.

sont à vingt ans. C'est donc dans la jeunesse que les massifs exigent le plus du sol, et c'est à cet âge que l'enlèvement de la couverture est le plus dommageable. C'est pour les peuplements exploitables qu'il l'est le moins. Ajoutons, cependant, que de tels peuplements qui doivent être régénérés dans quelques années doivent garder leur couverture et leur humus dans l'intérêt des jeunes semis (E. Ebermayer).

Le mode d'exploitation ne doit pas être perdu de vue dans cette question de la couverture. « Le taillis simple et le taillis sous-futaie ont besoin d'être plus protégés que la futaie, parce qu'ils ne produisent guère que des bois de faible dimension (rondins, fagots), exigeant plus de principes minéraux que les gros fûts. En outre, comme la révolution est beaucoup plus courte, le sol est bien plus souvent découvert que dans la futaie. » (E. Ebermayer.)

D'après ce que nous venons de dire, les règles relatives à l'enlèvement de la couverture peuvent être formulées à peu près comme il suit :

L'enlèvement de la couverture diminue généralement la fertilité du sol forestier et n'est tolérable ou commandé que dans des conditions déterminées.

On doit ABANDONNER *cette pratique partout où le sol est pauvre en principes nutritifs, superficiel et perméable, où le terrain présente de fortes pentes, exposées à l'est et au sud, où les arbres sont dans la période d'active croissance, où les feuillus constituent le peuplement et où la révolution est courte (taillis simple ou sous-futaie).*

On peut la TOLÉRER *sur les sols compacts, profonds, riches en principes nutritifs, sur les versants ouest ou nord, dans les peuplements âgés et serrés, dans les futaies lorsque les conditions de l'accroissement sont favorables.*

Elle semble COMMANDÉE *là où se trouvent dans les résineux des tapis de mousse trop épais, là où s'accumule la couverture dans les fonds de vallée et aussi là où se forme trop d'humus brut.*

En tout cas, on ne doit pas ratisser la couverture à de trop courts intervalles, et dans les points où, après un mûr examen des conditions locales, cette pratique peut être admise, il faut la soumettre à une périodicité de quatre à six ans. Elle doit se limiter à l'enlève-

ment de la couverture fraîche en épargnant autant que possible la couche d'humus. Aussi ne doit-on employer que des instruments en bois; les râteaux de fer doivent être proscrits. La meilleure époque de récolte est un peu avant la chute des feuilles[1].

Puisque nous venons de parler du meilleur traitement de la couverture en forêt, il est intéressant de connaître *comment on peut s'opposer à la formation de l'humus brut* si nuisible au sol (p. 427). Il sera évidemment plus avantageux de l'empêcher de se constituer, eu égard aux difficultés de son enlèvement.

Comme il se forme soit par manque, soit par excès d'humidité, on doit conclure que la densité du massif est tout d'abord à considérer. Il est clair que toutes les opérations conduisant à un état de massif normal empêchent la formation de l'humus brut.

Donc, dans les forêts exposées à ce danger, il faudra éviter l'état clair, et, dans les endroits peu ensoleillés et où, pour ce motif, il y a souvent excès d'humidité, on devra plus espacer les arbres. Ce sont les conditions locales qui indiquent les mesures à prendre. Il faudra toujours se garer d'un desséchement de la couverture comme d'une excessive humidité. Si l'on obtient un taux moyen propice à l'érémacausis, on favorise en même temps la vie animale qui vient activer encore la décomposition.

Vient ensuite le travail du sol dans le but d'écarter l'influence désavantageuse de l'humus brut; mais, malheureusement, en pratique forestière on ne peut employer ce moyen en grand. Tout au plus s'en rapproche-t-on en laissant divaguer en forêt les porcs et les ruminants. Le dommage que causent ces animaux en broutant ou en lésant les racines n'est rien à côté du service qu'ils rendent en fouissant et bouleversant le sol et en y laissant leurs excréments.

Les chaulages, qui font passer en combinaison l'acide humique nuisible et qui favorisent l'érémacausis des matières organiques de la couverture, feraient aussi bon effet. On les a employés avec succès dans quelques forêts danoises[2].

---

1. On le comprend aisément si l'on réfléchit que, dans l'intervalle des deux récoltes, certains principes minéraux, la potasse notamment, sont dissous de la couverture par les eaux météoriques et s'incorporent au sol.

2. E. RAMANN, *Forstliche Bodenkunde und Standortslehre,* Berlin, 1893, p. 457.

Enfin, il est possible, quoique dans une mesure limitée, de lutter contre l'humus brut par un choix judicieux d'essences. Ce choix est commandé, il est vrai, par le sol et le climat; mais on peut, dans certaines circonstances, s'écarter de la règle ordinaire en vue du but à atteindre. Ainsi, dans les cantons exposés, on mettra le sol dans un meilleur état en cultivant le hètre (dont les feuilles font facilement de l'humus brut) en mélange avec des essences de lumière (pin sylvestre) dont les détritus sont bien plus favorables à l'érémacausis.

L'influence nuisible de l'humus brut sur le sol peut être aussi envisagée au point de vue de l'alios qui entrave fortement la végétation, nous l'avons vu (p. 432), en s'opposant à la pénétration de l'eau et des racines dans les couches profondes du sol. C'est pour cela que dans la *culture de l'alios,* il faut, avant tout, songer à briser cette couche; c'est ainsi seulement qu'on paralysera ses inconvénients. Alors, les racines auront à leur disposition des zones plus profondes, plus riches en eau et en principes minéraux et la végétation des pins sylvestres et des épicéas, qui conviennent le mieux à ces pauvres sols, s'en trouvera bien améliorée. Il y a aussi cette circonstance favorable que les amas d'eau lors des grandes pluies et le dessèchement du sol par les sécheresses persistantes ne se présenteront plus après qu'on se sera débarrassé de l'alios.

La rupture de l'alios peut s'opérer de diverses manières, soit en creusant des trous pour y mettre les végétaux, soit en le brisant par bandes ou en plein, soit en formant des plates-bandes[1].

Dans la culture par trous, on perfore la couche d'alios sur les points où l'on doit planter le pin sylvestre : les trous ont 30-40 centimètres ou plus. Ce procédé est le plus économique; mais il ne remplit que très imparfaitement le but visé. Dans les premières années, il est vrai, les plantes se développent passablement; bientôt elles sèchent en cime et meurent peu à peu. Cela tient à ce qu'il se forme dans les couches profondes au milieu desquelles l'arbre se trouve et

---

1. H. Burckhardt, *Säen und Pflanzen nach forstlicher Praxis,* Hannover, 1855. p. 146; J. Wessely, *Der europäische Flugsand und seine Cultur,* Wien, 1873, p. 203; E. Ramann, *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen,* 1886, fasc. I.

à partir des bords du trou, un manchon d'alios qui empêche la pénétration des racines dans le sol (p. 429). Même si l'arbre réussit bien, on trouve à la prochaine exploitation, au lieu d'une faible couche d'alios, un trou profond (*topf*), et toute nouvelle culture y est presque impossible sans un travail profond du sol. Il en résulte que cette culture par trous entraîne une détérioration persistante du sol. Même si la première récolte réussit, les suivantes pâtiront. Ce mode de culture de l'alios paraît donc devoir être rejeté.

C'est seulement dans les sols de forêts qu'on améliore la végétation des massifs par ce procédé, parce que les feuilles mortes donnent d'assez grandes quantités de principes minéraux et que la composition de l'humus devient plus favorable.

Dans la culture par bandes, l'alios est brisé soit sur toute sa surface, soit par bandes. Le premier procédé n'est pas à recommander à cause de son prix, d'autant plus que le second, bien plus économique, donne des résultats pleinement satisfaisants.

Si l'alios est assez superficiel pour que la charrue puisse l'atteindre et s'il n'est pas trop dur, on peut le briser aisément à la charrue. L'alios est ensuite ameubli avec une défonceuse et laissé en place ou ramené à la surface par une charrue retourneuse, ce qui vaut mieux ; car si l'on se contente de pulvériser l'alios sans le mélanger à l'autre sol, il se recimente bientôt.

La culture par bandes avec mélange complet des couches du sol offre pour l'avenir une grande sécurité. Il se forme bien aussi, sur les bords des bandes, des lames (*Töpfe*) d'alios, comme il arrive chaque fois qu'on le rompt ; mais, au lieu de former une cavité close comme dans la culture par trous et de reconstituer une nappe continue, une surface importante au milieu des bandes reste libre d'alios, et il se forme ainsi pour longtemps, sinon pour toujours, un sol de bonne qualité. Il ne faut pas que les bandes soient trop étroites, car il pourrait se faire que les lames d'alios qui se forment sur leurs bords se rejoignissent. D'après les expériences faites à ce sujet, les bandes doivent avoir 1 mètre de large et mieux 2 mètres.

Quand l'alios est trop profond pour être atteint par la charrue, il faut faire le travail de main d'homme. On creuse d'abord des fossés de 1-2 mètres de large jusqu'à l'alios que l'on brise ensuite à la

pioche et que l'on ramène à la surface. Quand l'alios est décomposé, on recomble les fossés en mettant l'alios par-dessus. Si les fossés sont près l'un de l'autre, on jette la terre d'un fossé dans celui qui précède et on le remplit de façon que l'alios soit à la surface.

La culture par bandes, telle que nous venons de la décrire, mérite la préférence sur tous les autres procédés, parce que les arbres peuvent enfoncer leurs racines dans les couches plus profondes et, qu'en outre, le sol s'enrichit des principes nutritifs solubles formés dans la décomposition de l'alios. Mais cette culture exige des terrains secs; dans les sols mouilleux, c'est le mode par plates-bandes qui est indiqué, parce qu'il permet de s'affranchir de l'humidité en excès.

Dans ce procédé, on dispose des plates-bandes de 4 à 5 mètres de large et l'on creuse de chaque côté des fossés de $1^m,25$ à $1^m,50$ de large allant jusqu'au-dessous de la couche d'alios. On jette la terre de ces fossés sur la plate-bande de façon que l'alios soit à la surface. On facilite ainsi l'écoulement de l'eau et on évite l'état mouilleux, mais on expose les cultures au danger du desséchement pendant les périodes sèches.

Il peut ici encore se former des lames d'alios nouveau; mais, si les fossés sont assez larges, elles ne peuvent se rejoindre en une couche continue.

On ne doit pas conseiller de boiser les surfaces où l'on rencontre « l'alios brun inférieur » (Ramann[1]), à cause de la grande épaisseur de cette formation, de son gisement profond et de sa difficile décomposition. Rarement, on pourra briser ces couches dures; une simple culture par bande est de même insuffisante. C'est seulement sur les points où la nappe souterraine est dans de bonnes conditions que le produit en bois pourra payer à la rigueur les frais élevés de culture. On devra se demander si la culture agricole ne donnera pas un meilleur revenu à frais égaux ou moindres.

Il nous reste maintenant à décrire brièvement les meilleurs procé-

---

1. Cet « alios brun inférieur » se présente dans les bruyères mouilleuses. Il a pour caractéristiques sa dureté et sa couleur (du jaune au brun) plus claire que celle de l'alios ordinaire. Exposé à l'air, il résiste bien plus longtemps aux actions atmosphériques; il se montre en couches bien plus épaisses que l'alios ordinaire qui le recouvre d'habitude en lames plus minces.

dés relatifs au *défrichement des sols forestiers*, à leur transformation en sols agricoles. Quand une telle transformation se présente comme avantageuse, les travaux ultérieurs de préparation du sol sont bien facilités si l'on abat les arbres tout d'une pièce avec leurs racines plutôt que de procéder par l'exploitation rez terre à la hache ou à la scie suivie de l'arrachage des souches. Entre autres avantages[1], le premier procédé a celui d'extraire du sol la plus grande partie des racines qui ne pourraient être enlevées qu'avec des frais disproportionnés.

L'exploitation du sol après l'arrachage des racines peut se faire de diverses manières. On est naturellement guidé dans ce choix avant tout par la composition du sol et celle de l'humus qui le recouvre. Meilleures elles sont, plus on pourra faire de fortes dépenses avec espoir de rémunération et inversement. Sur des sols de qualité moyenne (lehm sableux ou lehm), on sera généralement récompensé d'une préparation soignée par les récoltes ultérieures, tandis que sur les sols légers (sable lehmeux et sable) on ne rentrera dans ses frais que s'ils sont très modérés.

La composition de l'humus doit aussi être prise en grande considération. Si c'est du terreau neutre, la fertilité du sol est bien mieux garantie que si c'est de l'humus brut et de la tourbe, beaucoup plus rebelles à la décomposition et contenant des substances nuisibles telles que les acides de l'humus et les sels de fer au minimum.

Il s'ensuit que les humus de ce dernier groupe donnent en se décomposant moins de principes nutritifs que le terreau et ont une action nuisible sur la végétation tant qu'ils ne sont pas complètement transformés. Pour supprimer leurs inconvénients, il faut employer les chaulages et tous les procédés permettant la plus large aération de ces matières.

La manière la plus simple de travailler le sol consiste à herser le terrain défriché au printemps avec une lourde herse sans le labourer et à y semer de l'avoine. On l'enterre par un hersage ; on ramasse toutes les racines ; on herse encore une fois et on roule. On laboure à l'automne et au printemps suivant on peut y mettre à nou-

1. Voir K. Gayer, *Die Forstbenutzung,* Berlin, 1894.

veau de l'avoine. La troisième année, il est bon de semer du fourrage vert. On doit semer dru pour étouffer les mauvaises herbes. Pour les ensemencements ultérieurs, on choisit les récoltes qui conviennent au sol.

Le labourage du terrain défriché, préalablement aplani, exige une dépense de force extraordinaire et l'emploi de charrues très solides; et il est tellement inégal que ces instruments se brisent facilement. En même temps, il faut enlever les plus fortes racines et les pierres avec des outils à main. Le travail à la charrue serait très facilité si on parcourait le sol par sillons croisés avec des instruments tranchants, parce que, du moins, les racines ne briseraient plus les instruments. Après le labour on herse énergiquement. Il est indispensable d'obtenir par les manipulations ultérieures un mélange parfait des éléments, et pour cela mieux vaut l'extirpateur que la charrue.

Sur de bons sols on doit préférer à la charrue la culture par bandes, bien qu'elle coûte plus cher. Suivant la qualité du terrain, le défoncement des bandes doit être fait jusqu'à 40, 90 centimètres.

Par ce procédé, le sol est d'abord complètement purgé de racines et de pierres et, de plus, il est mis le plus vite possible en état de porter des récoltes. On creuse un fossé de 90 centimètres de large le long du champ et on transporte la terre à l'autre bout pour remplir avec elle, plus tard, le dernier fossé.

Quand le fossé est achevé, on enlève et on met de côté la couche d'humus existant sur la bande que l'on va creuser et l'on jette le reste de la terre dans le fossé préalablement creusé qu'on recouvre avec la couche d'humus. On continue ainsi jusqu'à ce qu'on arrive à l'extrémité du champ. Les travaux doivent être faits au printemps, après les gelées, parce que le sol peut encore donner une récolte cette même année.

C'est la composition du sol surtout qui décide de l'assolement. Comme première culture, l'avoine est la plus avantageuse, puis on mettra de l'avoine encore la seconde année, ensuite des fourrages verts, ou des pommes de terre, ou du seigle. En général, on fumera le sol la seconde année ou, au plus tard, la troisième avec des engrais chimiques, parce que le fumier de ferme, les composts ne sont

pas sur place et coûteraient trop cher. Le plus souvent on peut aisément s'en passer, puisque le sol forestier renferme beaucoup d'humus et de matières azotées. Il suffit d'apporter de la kaïnite et des scories phosphatées. C'est seulement quand il y a peu d'humus ou que les matières organiques sont difficilement décomposables qu'une addition d'engrais chimiques azotés (nitrate de soude) est nécessaire. S'il y a de l'humus brut ou de la tourbe, on devra chauler la première année. Si le champ n'est prêt que tard au printemps, le mieux est d'y mettre comme première récolte un mélange de seigle de bois (1 partie)[1] et d'avoine (3 parties). Le premier, on le sait, ne se met pas en épi dans l'année où on le sème, il ne fait que taller, et c'est la seconde année qu'il arrive à maturité. L'avantage de ce procédé consiste en ce que l'on a deux récoltes avec un seul ensemencement.

8. — Plantes à cultiver.

D'après ce que nous venons de dire, l'influence des diverses cultures sur celles des propriétés physiques du sol (perméabilité, taux d'eau, température) qui règlent la décomposition des matières organiques et les pertes d'azote se comprend d'elle-même (p. 229), si bien que nous avons ici peu de chose à en dire.

Rappelons d'abord ces deux points : l'humidité du sol et sa température s'abaissent d'autant plus, la décomposition, par suite, est d'autant plus lente que les plantes sont plus serrées et se développent plus vigoureusement, que leur saison de végétation est plus longue et que l'intervalle entre la récolte et l'installation d'une nouvelle culture est plus courte. Généralement l'intensité de l'érémacausis en même temps que le lessivage des nitrates diminuent quand on cultive des fourrages permanents ; par contre, ces processus sont favorisés par les végétaux qui, comme les plantes sarclées et diverses plantes industrielles, sont largement espacés et sont buttés. Les autres végétaux se placent sous ce rapport entre ces deux extrêmes suivant le développement de leurs organes aériens et souterrains et suivant la durée de leur végétation.

Il ne faut pas non plus perdre de vue l'influence de la durée de la

1. Seigle suffrutescent (*Wald- oder Staudenroggen*).

jachère. Pendant l'état de jachère, l'érémacausis est à son maximum ainsi que la dissolution des nitrates (p. 474).

On doit évidemment tenir compte de tous ces facteurs pour que les principes nutritifs contenus dans les matières organiques agissent de la manière la plus parfaite et pour que les pertes soient le plus possible évitées.

Quant à l'assolement, il paraît rationnel de faire précéder les plantes dont la culture provoque une forte destruction de la matière organique par suite des ameublissements fréquents, de leur grand espacement ou de la jachère prolongée, de les faire précéder, dis-je, par des plantes telles que les céréales, qui exigent une riche provision de matières assimilables. Par la culture de papilionacées vivaces qui augmentent sensiblement la dose des matières organiques du sol (p. 265), on assurera la réussite d'une récolte subséquente particulièrement exigeante comme alimentation. En faisant alterner les plantes épuisantes et les plantes accumulatrices, sans parler d'autres procédés appropriés, on utilisera au mieux les forces productives du sol et on remplira un *desideratum* de l'agriculture moderne qui est d'abaisser les frais de production sans diminuer les rendements.

Il va sans dire qu'on doit tenir compte aussi dans l'assolement de la durée des jachères. Quand cette durée est telle qu'on doive craindre une perte de principes nutritifs et qu'un changement dans la sole paraît inopportun pour des raisons économiques, il faut employer les moyens précédemment indiqués.

Enfin, n'oublions pas que la culture de végétaux pérennes peut, à côté de multiples avantages, avoir aussi des inconvénients pour la fertilité des sols, surtout s'ils sont compacts.

L'installation d'oseraies, de luzernières, etc., a sur de tels sols une action défavorable, parce que, ne subissant aucune culture pendant plusieurs années, ils deviennent de plus en plus serrés ; finalement, la quantité d'air nécessaire pour une décomposition normale des matières organiques y fait défaut et alors entrent en jeu les processus de désoxydation qui restreignent la fertilité. C'est pour cela que sur des terrains de cette nature il faut éviter de cultiver des plantes qui aient une trop longue végétation.

CHAPITRE III

ACTION DES ENGRAIS D'ORIGINE ORGANIQUE SUR L'ÉRÉMACAUSIS

1. — Excréments des mammifères domestiques.

Les excréments des mammifères domestiques (fèces et urine) qui sont employés pour engrais, soit directement comme dans le pâturage et le parcage, soit le plus souvent indirectement en mélange avec diverses litières, sous forme de fumier, ont une composition physique et chimique différente suivant le genre auquel ils appartiennent, suivant aussi la qualité et la quantité des litières. Cette composition importe pour l'érémacausis.

On peut admettre, d'après A. Mayer[1], que ces excréments ont en moyenne la composition centésimale suivante :

ÉLÉMENTS.	MOUTON.			CHEVAL.			VACHE.			PORC.		
	Fèces.	Urine.	Mélange.	Fèces.	Urine.	Mélange.	Fèces.	Urine.	Mélange.	Fèces.	Urine.	Mélange.
Eau	65.5	87.5	68.0	75.8	90.0	77.9	83.5	93.8	86.8	79-84	97.5	82-87
Matière organique et volatile	31.4	8.0	28.0	21.0	7.0	19.0	14.6	3.2	11.0	10-15	1.5-2.8	9-14
Contenant en azote	0.6	1.9	0.9	0.44	1.5	0.6	0.29	0.6	0.4	0.6-0.7	0.3-0.4	0.5-0.6
Cendres	3.1	4.5	4.0	3.2	3.0	3.1	1.9	3.0	2.2	3-5	1.0-1.5	3-4
Contenant en acide phosphorique	0.3	Traces.	0.4	0.32	0	0.3	0.17	0	0.13	0.1-0.4	0.1	0.1-0.2
Et en potasse	0.15	2.3	1.0	0.35	1.6	0.5	0.1	1.3	0.6	0.3	0.7-0.8	0.5

Abstraction faite des variations dues à l'alimentation et à la faculté

1. A. Mayer, *Die Düngerlehre,* Heidelberg, 1895.

assimilatrice des animaux, on peut déduire de ces chiffres qu'en général le fumier de mouton est le plus pauvre en eau, mais le plus riche en matières nutritives; vient ensuite celui de cheval, tandis que le fumier de vache et plus encore celui de porc contiennent la plus grande quantité d'eau et la moindre de principes organiques, minéraux et surtout azotés. L'intensité de la décomposition est corrélative de la concentration des excréments; le fumier de mouton et celui de cheval se décomposent le plus vite; celui de vache vient ensuite, et c'est le fumier de porc qui est le plus rebelle. Les propriétés physiques et chimiques des excréments interviennent dans l'explication de ces différences. La décomposition rapide du fumier de cheval, si rapide qu'elle provoque dans le tas un fort échauffement, tient à ce que les fèces forment une masse poreuse, peu cohérente. De même si le fumier de mouton *se fait* vite, cela n'est pas dû seulement à sa grande concentration et à la richesse de l'urine en azote, mais encore à ce que le crottin contient peu d'eau et offre une large surface à l'air. La décomposition difficile du fumier de vache tient d'abord à son état aqueux et gluant qui, par le dessèchement, forme une croûte impénétrable à l'air. Il en est de même pour le fumier de porc.

Le taux d'éléments précieux dans les excréments dépend de la quantité et de la composition de la nourriture et des substances employées à la formation des produits animaux (viande, graisse, lait). En général, le fumier est d'autant plus riche en principes nutritifs que les aliments sont eux-mêmes plus riches sous ce rapport et inversement. Ceci est vrai pour les quantités non seulement relatives, mais encore absolues des matières excrémentitielles, comme pour les animaux faisant de la viande ou du lait, parce que, d'après une loi générale de nutrition, un surcroît de production correspond à une transformation égale de matières dans le corps des animaux. La faculté assimilatrice des animaux est en rapport avec le taux des éléments contenus dans les excréments. Chez les animaux de trait (cheval, bœuf) et chez ceux qui produisent de la laine (brebis à laine) — on peut les mettre dans ce groupe, puisque le taux de matières contenues dans la laine est très faible par rapport à celui du fourrage — tous les principes azotés et minéraux reparaissent dans

les excrétions. Chez les bêtes jeunes, ou à lait, ou à l'engrais, ou en gestation, une certaine partie des éléments de la nourriture est employée à produire des muscles, de la graisse ou du lait et ne se retrouve pas dans les déjections.

Quant à la composition des excréments, il importe de savoir que les éléments azotés des fèces sont principalement sous forme de matières albuminoïdes et de leurs dérivées qui se décomposent bien plus difficilement que celles de l'urine presque entièrement formées d'acide hippurique (herbivores) ou d'urée (porc). Ces principes, très vite après l'évacuation, subissent une fermentation (p. 23) qui les transforme en carbonate d'ammoniaque volatil, d'où perte d'un aliment de première importance. La décomposition est d'autant plus rapide que l'urine est plus concentrée. C'est pourquoi la fermentation de l'urine de cheval et de mouton se fait bien plus vite que celle de vache et de porc.

En considérant les autres éléments, on arrive à la conclusion que l'urine est plus importante dans la nutrition des plantes que les déjections solides, parce qu'elle est plus riche en principes azotés et potassiques assimilables ; l'acide phosphorique, chez les herbivores, se trouve uniquement dans les fèces. Donc, un fumier complet, doté de toutes les substances nutritives, doit contenir les deux sortes de déjections. Quand le fumier renferme principalement de l'urine, il agit par ses propriétés nourrissantes ; s'il est surtout riche en excréments solides, étant donnée la décomposition bien plus lente de ses éléments, c'est avant tout sur la formation de l'humus qu'il influe.

Les déjections sont presque toujours accompagnées de litières formées de pailles ou d'autres déchets végétaux de composition analogue. Ces matières ne servent pas seulement à absorber les excréments, à les enrober et à faire ainsi qu'il ne s'en perde pas ; elles ont aussi pour but de modérer leur décomposition et d'enrichir la masse en substances formatrices d'humus.

Relativement aux déjections animales, les litières ont une bien plus faible aptitude à la décomposition, qui s'augmente dès qu'elles sont mélangées à ces déjections. Elle est du reste très variée. Parmi les litières les plus employées, la paille des légumineuses, à cause de sa forte teneur en matières azotées, se décompose le plus facilement ;

on l'utilise mieux comme fourrage. La paille de céréales et de colza, moins azotée, est moins altérable, et la litière forestière (feuilles et aiguilles des arbres) l'est encore moins. C'est la litière de tourbe qui, malgré son taux élevé d'azote, est le plus rebelle à la décomposition, si bien que l'azote et les principes minéraux de la tourbe ne doivent pas entrer dans le calcul de la richesse du fumier (p. 166 et 286). Ce n'est pas le cas des autres litières qui, outre qu'elles augmentent le taux du fumier en matières organiques formatrices d'humus, contribuent encore, par les principes assimilables naissant dans leur décomposition, à élever le taux des éléments nutritifs de la masse.

Les chiffres suivants de A. MAYER[1] donnent une idée approchée du taux centésimal de matières organiques et d'éléments nutritifs apportés au fumier par les litières :

ÉLÉMENTS.	PAILLE de céréales.	PAILLE de pois.	PAILLE de fèves.	ROSEAUX	ROSEAUX et joncs.	BRUYÈRE	FEUILLES d'arbre à l'automne.	AIGUILLES fraîches d'épicéa et de pin sylvestre
Eau	12-21	12-17	14-22	18	14	20	13-15	47.5
Matière organique	75-83	82-83	76	78	79-81	76	78-81	52
Azote	0.3 0.9	2.0	1.7	1.4	2.0	1.0	0.8-1.4	0.5-0.9
Potasse	0.5-1.1	1.1	1.8	0.3	1.7-2.3	0.5	0.15-0.4	0.03-0.1
Acide phosphorique	0.2-0.3	0.4	0.3	0.1	0.3-0.5	0.2	0.2-0 3	0.1-0.2
Cendres	3-8	3-4	5-9	3.9	4.6-7.0	3.6	4.2-5.7	0.8

La valeur variable des litières tient non seulement à leur teneur en azote, mais encore à leur plus ou moins grande aptitude à absorber les déjections et à former avec elles une masse bien liée. A cet égard, c'est la paille des céréales qui convient le mieux parce que, en raison de ses tiges creuses et des vides qu'elles maintiennent dans leur masse, elle absorbe le mieux les matières volatiles précieuses et que, d'autre part, à cause de la consistance des chaumes, elle amalgame très bien les excréments solides. Les feuilles et les aiguilles de la couverture forestière sont bien loin de la paille sous ce rapport, non pas déjà qu'elles soient moins aptes à absorber

1. A. MAYER, *Lehrbuch der Agriculturchemie*, Heidelberg, 1886, vol. II, p. 186 et 187.

l'urine, mais parce que, gisant en une couche compacte, elles forment avec les excréments une masse difficilement perméable et que, d'autre part, elles sont peu cohérentes et difficiles à charger et à manipuler.

Par animal adulte la quantité de litière à donner par jour est :

Mouton.	0,25-0,35	kilogr.
Cheval	2,00-3,00	—
Vache	4,00-6,00	—
Porc.	3,50-4,00	—

S'il s'agit de litière de tourbe il faut :

Mouton.	»	
Cheval	2,50	kilogr.
Vache	3,00-3,50	—
Porc.	1,00-2,00	—

Dans les années où la paille est chère il est bon de mélanger à la paille de la tourbe qui absorbe principalement les déjections liquides.

Il faut évidemment avoir soin que le sol des écuries, que les rigoles emmenant l'urine, que le sol des places à fumier, etc., soient imperméables [1].

Le fumier, ainsi traité, s'accumulant peu à peu en grosses masses, subit, sous l'influence de nombreux microorganismes, des modifications qui présentent, outre leur intérêt scientifique, un intérêt pratique tel que la composition et l'action du fumier diffèrent énormément suivant les réactions qui s'y passent.

Si l'on n'emploie généralement pas le fumier à l'état frais, c'est parce qu'il ne contient qu'une faible quantité de matières assimilables, quantité qui s'augmente à mesure que les matières organiques se décomposent. Le fumier n'aura de puissance nutritive sérieuse que quand sa décomposition aura atteint certaines limites. Mais jamais elle ne doit aller si loin que la plus grande partie des matières organiques soit perdue par volatilisation ; car le fumier n'agit pas seulement par ses éléments solubles, il forme aussi de l'humus par

1. Voir F. ENGEL, *Handbuch des landwirthschaftlichen Bauwesens,* Berlin, 1895, p. 409.

ses éléments insolubles; pour qu'il améliore ainsi le sol d'une façon durable, il faut conserver dans le fumier une plus ou moins grande partie des matières organiques.

A cet égard comme à celui du degré de décomposition auquel le fumier doit être employé, ce sont les exigences des végétaux et la nature du sol qui doivent décider; il est très désirable aussi — étant donné que dans les transformations chimiques de la masse il se produit facilement des pertes notables en principes importants, surtout en azote — de découvrir des moyens permettant de régler complètement les processus de décomposition du fumier.

La règle générale à observer résulte des considérations exprimées au début de ce chapitre. Il faudra évidemment faire en sorte que, dans le traitement du fumier, l'érémacausis seule puisse se manifester et écarter toutes les circonstances qui pourraient amener la putréfaction. C'est seulement ainsi qu'on obtiendra un fumier contenant les éléments nutritifs à un état facilement assimilable et fournissant de l'humus apte à se transformer en combinaisons chimiques simples, tandis qu'avec le mode par putréfaction une plus ou moins grande portion des matières organiques passe en composés peu ou point altérables et les éléments nutritifs y contenus ne sortent pas leur plein effet (p. 12). Ajoutons que dans l'érémacausis il ne se dégage pas d'azote élémentaire ou très peu, et que, dans la putréfaction au contraire, ce processus a lieu sur une assez grande échelle et amène une diminution notable de la provision d'azote (p. 18). Il n'est pas démontré jusqu'ici que les bactéries dénitrifiantes découvertes par R. Burri et A. Stutzer (p. 48) dégagent de notables quantités d'azote libre sous l'influence de l'oxygène (érémacausis); c'est d'autant plus invraisemblable que la nitrification est lente dans une masse exclusivement formée de matières organiques et n'est rien auprès de la production d'ammoniaque, qui est surtout importante dans ces conditions (p. 148).

Dans le fumier en tas il y a d'ordinaire deux réactions, l'érémacausis dans les couches supérieures, poreuses, perméables et la putréfaction dans les couches inférieures, compactes, généralement saturées d'eau et de purin. Elles le sont même quand l'eau qui tombe dans la cour est détournée de la place à fumier et qu'il n'ar-

rive à la masse que l'eau apportée par les précipitations atmosphériques, parce que l'humidité pénétrant dans le fond se rassemble sur la sole imperméable et de là ne gagne que très lentement la surface inclinée, à cause de la faible perméabilité des couches du fumier.

Des pertes sérieuses par dégagement d'azote élémentaire dans les zones soumises à la putréfaction sont alors inévitables, les nitrates dissous dans les couches supérieures et amenés vers le fond étant détruits par les bactéries dénitrifiantes qu'il contient (p. 90).

De ces considérations on pourrait conclure qu'il est très avantageux de mettre le fumier dans un état aussi meuble que possible puisqu'on favorisera ainsi l'accès de l'air nécessaire à une active érémacausis. Ce serait cependant une mauvaise opération parce qu'une grande partie de la matière organique serait détruite par la combustion extrêmement rapide[1], sans parler des autres pertes provoquées par l'excessive perméabilité de la masse. Pour parer à ces inconvénients, il faudra *limiter l'accès de l'air dans les tas de fumier en disposant des couches compactes de façon que l'érémacausis puisse s'y faire lentement, mais que l'air arrive quelque peu et empêche la putréfaction de se produire.* On atteint sûrement ce résultat en répandant et tassant le fumier régulièrement chaque fois qu'on vide les écuries et en ayant soin qu'il n'y ait pas d'humidité en excès dans les interstices. Sous ces conditions le fumier reste perméable à de grandes profondeurs et il n'y a pas de putréfaction. D'ailleurs, on pourra modifier les moyens à employer d'après les usages suivis par les praticiens.

Le maintien d'une certaine quantité d'air dans le fumier n'est possible que si l'on emploie comme litière de la paille de céréales en quantité suffisante. Avec la litière forestière on obtient presque toujours une masse imperméable. Le meilleur moyen d'entretenir une humidité égale et modérée est de diminuer artificiellement l'évaporation et d'empêcher l'arrivée de l'eau en excès. Ces deux conditions sont remplies quand le fumier reste sous les animaux parce qu'il est soustrait à l'évaporation et aux précipitations. Sous le rapport de

1. Voir R. Heinrich, *Zweiter Bericht über die Verhältnisse und Wirksamkeit der landwirthschaftlichen Versuchsstation zu Rostock,* Berlin, 1894, p. 239.

l'humidité le fumier en plein air est moins bien placé, car il y a de grandes variations suivant les circonstances atmosphériques et, de plus, il se produit dans les couches profondes des décompositions anormales. Pour maintenir une humidité sensiblement égale, il est utile d'humecter la masse à l'entrée des périodes sèches ou de la couvrir d'une mince couche de paille, de terre ou de tourbe et, pour enlever l'excès d'eau des couches inférieures, il faut user de procédés permettant l'égouttement aussi parfait que possible des couches profondes.

On suffirait à toutes les exigences en entassant le fumier soit à l'étable, soit sur la place à fumier, sur une grille en ménageant dessous un espace qui serait muni sur le fond et les côtés de parois imperméables. Le fond serait en pente pour que le purin pût être emmené par une rigole. On pourra ainsi parer à l'accumulation de liquides en excès et permettre à l'air de pénétrer la masse dans certaines limites. Avec les procédés ordinaires où le fumier repose directement sur une sole imperméable, l'égouttement des liquides accumulés au fond est empêché, même si la sole est en pente, parce que le mouvement latéral du purin est extrêmement difficile.

Le mélange des diverses sortes de fumier semble commandé si l'on veut obtenir des conditions favorables à l'érémacausis, à moins que des circonstances particulières (divers états physiques des sols) n'indiquent comme plus rationnelle la mise en tas par sortes distinctes. Les fumiers aqueux de vaches et de porcs donnent facilement lieu aux réactions de la putréfaction. Si on les mélange avec du fumier de cheval plus sec et plus perméable, on a une masse qui se prête bien mieux à l'érémacausis.

Le traitement rationnel des tas de fumier exige le maintien d'un taux moyen d'humidité ; donc, quand la sécheresse se met sur pied, sécheresse aussi nuisible que l'excès d'humidité, il faut arroser la surface avec le purin.

On ne devra pas se contenter d'observer les règles précédentes qui ont pour but d'amener des conditions normales de décomposition, parce qu'elles n'obvient pas du tout aux pertes d'azote et qu'avec elles on n'obtient pas encore la régularité désirable dans la marche de l'érémacausis. Pour atteindre ces buts il faut employer des pro-

cédés chimiques sans lesquels il n'est pas de traitement rationnel des fumiers.

Les méthodes de conservation ont pour but, d'une part, d'empêcher la perte d'azote, provoquée par la volatilisation du carbonate d'ammoniaque qui se forme dans la fermentation des éléments azotés de l'urine et peut-être par sa dissociation à l'état d'azote libre, et, d'autre part, de régler le cours de la décomposition. Les moyens employés atteignent ces buts soit partiellement, soit complètement. Voici les conclusions qu'on peut tirer jusqu'alors des recherches faites sur ces réactions extrêmement complexes[1].

L'emploi d'acides minéraux (acides sulfurique et chlorhydrique) est tout indiqué pour la fixation du carbonate d'ammoniaque volatil; bien que le but visé soit ainsi parfaitement atteint, on doit renoncer à l'emploi général de ces acides à cause du danger qu'ils présentent et du dommage qu'ils causeraient aux parois des récipients du purin.

Quand au gypse usité depuis longtemps dans ce but, les expériences ont donné des résultats contradictoires. Tandis que celles de H. GROUVEN (*Landw. Centralblatt von Wilda* 1861, p. 283) et de R. HEINRICH montraient que la transformation prévue du carbonate d'ammoniaque et du sulfate de chaux en sulfate d'ammoniaque et en carbonate de chaux était parfaitement obtenue par le mélange du gypse avec le fumier, d'autres expérimentateurs, tels que H. IMMENDORFF, MÜNTZ et GIRARD, ainsi que A. STUTZER et ses collaborateurs, ont trouvé que le gypse ne pouvait fixer qu'une certaine partie de l'ammoniaque et qu'une forte portion se volatilisait. On peut en conclure que très probablement des circonstances extérieures influent sur l'efficacité du gypse, sans doute déjà son état et la façon de l'employer.

---

1. Voir surtout : F. HOLDEFLEISS, *Untersuchungen über den Stallmist,* Breslau. 1889. — MÜNTZ et GIRARD, *Die Stickstoffverluste und deren Verminderung.* Analyse par H. VOGEL. — H. IMMENDORFF, *Journal für Landwirthschaft,* vol. 41, 1893, p. 1. — R. HEINRICH, *Zweiter Bericht über die Verhältnisse und Wirksamkeit der landw. Versuchsstationen zu Rostock,* Berlin, 1894, p. 239. — R. BURRI, E. HERFELDT et A. STUTZER, *Journal für Landwirtschaft,* vol. 43, p. 1. — A. STUTZER, *Leitfaden der Düngerlehre,* Leipzig, 1895, p. 34. — J. KÖNIG, *Wie kann der Landwirth den Stickstoff-Varrath in seiner Wirthschaft erhalten und vermehren?* Berlin, 1893. — A. MAYER, *Die Düngerlehre,* Heidelberg, 1895, p. 53.

Le but visé pourra être atteint si le gypse est à grain fin et s'il reste longtemps en contact avec le fumier ; cette dernière condition est le plus facilement obtenue en le répandant déjà dans l'étable par-dessus le fumier. On se demande si le sulfate de chaux ne perdrait pas plus ou moins de son influence par ce fait qu'il se réduit dans le fumier soumis à la putréfaction (p. 195). En outre, il peut intervenir des réactions qui gênent la fixation de l'ammoniaque par le gypse. C'est le cas s'il y a du carbonate de chaux qui provoque un retour partiel du sulfate d'ammoniaque en carbonate d'ammoniaque, si bien que les quatre sels, sulfate et carbonate de chaux, sulfate et carbonate d'ammoniaque, peuvent coexister (Müntz et Girard). On ne peut encore dire si ce fait est lié à des conditions déterminées. Il est possible enfin que le pouvoir de fixation du gypse subisse une diminution, seulement alors si la volatilisation de l'ammoniaque est favorisée par de hautes températures et si l'eau de dissolution est en faible quantité, tandis qu'il aura sa pleine action par des températures basses et avec un taux d'eau élevé (A. Mayer). Il serait plus simple et peut-être plus conforme à la réalité d'admettre que le gypse, vu sa lente action due à ce qu'il est difficilement soluble, ne peut fixer assez vite l'ammoniaque quand les éléments azotés de l'urine se décomposent activement, mais peut très bien suffire dans le cas où les réactions se font plus lentement. Concluons de tout ceci que l'influence du gypse sur la fixation de l'ammoniaque n'est pas encore suffisamment éclaircie et que, d'après les résultats obtenus jusqu'ici, on doit attribuer à ce moyen de conservation un rôle douteux.

Le produit vendu par les fabriques d'engrais sous le nom de *superphosphate gypseux* a une action beaucoup plus sûre que le gypse. C'est un superphosphate avec un fort taux de gypse ; on ajoute au phosphate tant d'acide sulfurique qu'une partie notable (6-13 p. 100) de l'acide phosphorique se trouve à l'état libre. Les expériences de H. Immendorff et de A. Stutzer montrent que l'ammoniaque est fixé de la manière la plus parfaite ; sous ce rapport le superphosphate gypseux doit être regardé comme le meilleur procédé de fixation. L'acide phosphorique passe à l'état de phosphate d'ammoniaque qui doit, avec le sulfate de chaux existant en grande

abondance, se transformer en formant du phosphate acide et basique de chaux[1]. Les réactions sont représentées par les équations suivantes :

$$2\,AzH_4\,H_2PO_4 + CaSO_4 + 2H_2O = (AzH_4)_2\,SO_4 + CaH_4\,(PO_4)_2,\,H_2O + H_2O\,; \quad (1)$$

$$(AzH_4)_2\,HPO_4 + CaSO_4 + 2H_2O = (AzH_4)_2\,SO_4 + CaHPO^4 + 2H_2O\,; \quad (2)$$

$$2\,(AzH_4)^3\,PO_4 + 3CaSO_4 = 3\,(AzH_4)_2\,SO_4 + Ca^3\,(PO_4)_2. \quad (3)$$

La moins-value résultant de la formation du phosphate neutre et basique de chaux n'est rien à côté de l'utilité qu'offre l'emploi du superphosphate gypseux pour fixer l'ammoniaque. Une retransformation du sulfate d'ammoniaque suivant le mode indiqué plus haut ne serait pas à craindre ici parce que l'action du carbonate de chaux est annihilée par l'acide.

Avec un taux assez fort (0.4 p. 100 et plus d'acide phosphorique soluble dans l'eau) non seulement, d'après A. STUTZER, les bactéries ammoniacales vivantes sont tuées, mais encore leurs spores (p. 97), ce qui interrompt la fermentation de l'ammoniaque et limite indirectement la perte de cet élément.

Mentionnons encore que le superphosphate gypseux qui ne renfermerait pas d'acide phosphorique libre et contiendrait surtout peu d'acide phosphorique soluble dans l'eau, dont l'acide phosphorique serait au contraire pour la plus grande partie à l'état tribasique, ne pourrait fixer le carbonate d'ammoniaque.

La quantité de superphosphate gypseux qui doit être répandue chaque jour dans les écuries est, d'après les expériences précédentes et suivant le taux du produit en acide phosphorique soluble :

Pour un cheval	0,40-0,75 kilogr.
Pour une vache	0,50-1,00 —
Pour un porc	0,10-0,20 —
Pour dix moutons	0,75-1,50 —

A défaut de superphosphate gypseux on pourra employer avec un

1. L. SCHUCHT. *Die Fabrikation des Superphosphats und Thomasphosphatmehls*, Braunschweig, 1891, p. 108.

égal succès du superphosphate ordinaire ayant environ 16 p. 100 d'acide phosphorique soluble et en même quantité que le superphosphate gypseux à taux élevé.

H. Vogel[1] a recommandé pour la fixation de l'ammoniaque le phosphate dicalcique sous la forme dite gypse précipité (mélange de gypse précipité avec phosphate bibasique de chaux). L'auteur est parti de l'hypothèse que l'acide phosphorique libre et le phosphate monocalcique du superphosphate gypseux acide seraient vite transformés en phosphate dicalcique dans la masse en fermentation et que celui-ci serait avec le gypse l'élément actif du superphosphate gypseux. Mais les essais de H. Immendorff et A. Stutzer ont prouvé que le phosphate dicalcique ne remplissait pas le but et que seul l'acide phosphorique soluble dans l'eau était l'élément actif de ce superphosphate.

Dans les cas où l'on a besoin aussi d'une fumure potassique on recommande, au lieu des sels précédents, les sels de potasse (kaïnite, carnallite, krugite) qui renferment la potasse et la magnésie sous forme de sulfate et de chlorure. Ces sels ont accusé beaucoup moins d'aptitude à fixer l'ammoniaque que le superphosphate gypseux. Cela se comprend si l'on considère que, dans la transformation du carbonate de potasse avec le sulfate de potasse et de magnésie, il s'établit bientôt un équilibre chimique et que les sels, ne pouvant achever leur transformation, restent tels quels, le carbonate d'ammoniaque aussi, qui alors se volatilise. « Quand une partie de ces sels volatils a disparu, par leur disparition même l'équilibre chimique sera détruit et se reformera peu à peu à l'aide du carbonate de potasse et du sulfate d'ammoniaque précédemment formés. » (A. Mayer.) Si les divers sels de potasse ne peuvent fixer qu'incomplètement l'ammoniaque, ils ont en revanche le pouvoir de diminuer indirectement la perte d'azote, en ce sens qu'employés en quantité suffisante ils entravent la fermentation ammoniacale.

Enfin, des recherches de F. Holdefleiss on doit conclure qu'outre

1. *Journal für Landwirthschaft*, 36e année, 1888, p. 217. — *Die Wirkung der gas-formigen Zersetzungs producte faulender organischer Substanzen auf die Phosphorsäure und ihre Kalksalze*, Berlin, 1893.

les moyens chimiques précédents, la terre peut diminuer les pertes d'azote si on l'emploie en couverture. Pour la conservation de l'azote la couverture de terre s'est montrée si appropriée que l'azote a été complètement ou presque complètement retenu. Semblable serait l'action d'une couverture de tourbe qui possède à un haut degré (on l'a vu ailleurs, p. 361) la faculté d'absorber les gaz et, par conséquent, le carbonate d'ammoniaque qui est volatil. On n'a pas encore établi si la tourbe exerce une action sur la formation même de l'ammoniaque par son emploi comme absorbant de l'urine.

Pour apprécier l'utilité pratique des divers procédés de conservation il faut envisager, outre leur action sur la fixation de l'ammoniaque, celles qu'ils exercent sur la forme de l'azote restant dans le fumier. Car les pertes d'azote peuvent être supprimées non seulement par la fixation du carbonate d'ammoniaque volatil, mais encore par la transformation de cet azote en principes non volatils (nitrates et nitrites) ou par l'arrêt de la fermentation. A cet égard les recherches, rapportées plus haut (p. 183), relatives à l'influence des sels sur la décomposition des matières organiques, de même que les essais de F. Holdefleiss sur le fumier de ferme, offrent des données précieuses.

On peut admettre en général que les phosphates et les sulfates favorisent la nitrification si, par leur addition, la concentration de la solution ne dépasse pas une certaine limite (p. 194). Cela concorde avec l'observation de F. Holdefleiss que, dans le fumier traité au superphosphate gypseux, il y avait une assez forte dose d'acide nitrique qui s'était sans doute formé par oxydation de l'ammoniaque (p. 6). Par contre, la kaïnite, qui renferme, à côté du sulfate de potasse et de magnésie, du chlorure de magnésium, a, dans ces expériences, entravé non seulement la nitrification à un degré extraordinaire, mais sensiblement aussi la formation d'ammoniaque. La contradiction entre ce résultat et ceux d'autres expérimentateurs n'est qu'apparente et s'explique par ce fait que les chlorures (de magnésium et de sodium), vu leurs propriétés antizymotiques, affaiblissent et arrêtent les réactions chimico-physiologiques (formation d'ammoniaque et d'acide nitrique) reposant sur l'activité des micro-organismes, et que tous les sels solubles ont le même effet quand ils se trouvent

en solution assez concentrée. Ainsi semble justifiée cette thèse que, dans les expériences de Holdefleiss et autres, les influences attribuées aux sels de potasse et de magnésie peuvent aussi bien et même plus justement être provoquées par les chlorures ou par la forte concentration de la solution saline. Des raisons analogues mènent en même temps à cette conclusion que les expériences actuelles sur la conservation des fumiers, expériences où les matières employées consistaient en un mélange de divers sels et où on ne tenait presque aucun compte de la concentration des solutions, sont absolument insuffisantes pour éclairer la question. On n'en possédera toutes les faces que quand on aura déterminé séparément les influences de chaque sel suivant la concentration de leur solution.

Pour le moment, en attendant le résultat des recherches exactes à poursuivre dans cette direction, on doit admettre, en se fondant sur diverses expériences de laboratoire, que les sulfates faiblement concentrés (sulfate de potasse, sulfate de chaux et de magnésie) favorisent la nitrification, mais qu'ils l'arrêtent, comme tout autre sel, à l'exception naturellement du sulfate de chaux, difficilement soluble, quand ils sont en solution trop concentrée (p. 195).

Remarquons ce fait, affirmé par F. Holdefleiss et qui concorde avec les observations de P. Pichard (p. 147), que le fumier recouvert de terre a éprouvé une forte nitrification. Elle était plus intense dans le fumier simplement humecté de purin et par conséquent plus perméable que dans le fumier saturé ; mais, même dans ce dernier, elle était encore considérable. La nitrification fut même plus accusée avec la couverture de terre qu'avec l'addition de superphosphate gypseux.

Des faits que nous venons de résumer, il ressort que les divers procédés de conservation employés jusqu'ici parent aux pertes d'azote dans le fumier de ferme de façons fort différentes, soit :

1° En fixant le carbonate d'ammoniaque volatil ;

2° En favorisant la nitrification ;

3° En diminuant l'activité des micro-organismes producteurs d'ammoniaque et de nitrate.

Ces trois modes devront être spécialement étudiés dans les recher-

ches à faire sur ce sujet pour qu'on voie clair dans ces réactions si importantes pour la pratique.

Les résultats acquis concernant l'influence de certains procédés sur les pertes d'azote et la nitrification dans la décomposition du fumier donnent déjà des indications quant à leur action sur le dégagement d'azote libre.

On ne peut douter qu'il n'ait lieu plus ou moins abondamment dans les tas de fumier quand ils sont saturés et, par suite de l'absence d'air, soumis à la putréfaction. Une autre question est de savoir si, même avec l'accès de l'air, les bactéries dénitrifiantes découvertes par A. STUTZER et R. BURRI (p. 48 et 89) peuvent agir assez activement. D'après les recherches de HOLDEFLEISS, on doit répondre catégoriquement non à cette question, parce que c'est justement quand la formation des nitrates se faisait sur la plus grande échelle qu'il y avait le moins de perte d'azote ou même pas. Si, comme on l'a vu, en couvrant le fumier avec de la terre ou en le mélangeant à du superphosphate gypseux, il s'y forme d'assez grandes quantités d'acide nitrique, on devrait constater, surtout avec l'emploi de la terre[1], un dégagement plus ou moins fort d'azote élémentaire, si les bactéries dénitrifiantes avaient manifesté une activité notable. Comme ce n'est pas le cas, comme l'azote est resté parfaitement fixé, on devra conclure que, du moins dans les circonstances en question, on ne doit attribuer aucun rôle aux bactéries dénitrifiantes.

Il reste maintenant à rechercher dans quelle mesure la décomposition des principes carbonés du fumier, ceux qui forment surtout l'humus, est influencée par les divers procédés de conservation. Avec le mode habituel, qui se passe de ces procédés, le fumier subit une perte importante en matière organique, perte qui est de 30 à 60 p. 100 et plus, suivant les circonstances extérieures et la durée de la décomposition. Une diminution si rapide des éléments formateurs de l'humus sera d'autant moins à souhaiter qu'on attribuera plus de prix, suivant les cas, à l'action améliorante du fumier. C'est pour

1. Quant au fumier traité avec le superphosphate gypseux, on pourrait objecter que, par suite de la réaction acide due à l'acide phosphorique soluble, l'activité des bactéries dénitrifiantes est suspendue.

cela que, dans maintes circonstances, la question des moyens à employer pour empêcher ces pertes prend une importance toute spéciale.

Par l'addition d'acides et de sels à doses suffisantes pour donner à la masse une réaction acide et à la solution une assez forte concentration, on atteint le but cherché, comme on l'a montré plus haut (p. 183 et 192).

Bien que les acides minéraux répondent à toutes les exigences au point de vue qui nous occupe, on ne les emploie pas à cause des raisons purement pratiques déjà exposées. Au contraire, on pourra penser à employer le superphosphate gypseux pour entraver la décomposition de la matière organique. Les essais de HOLDEFLEISS montrent qu'on perd ainsi moins de matière humifiante qu'en ne mettant rien dans le fumier, mais que la perte est encore très considérable. L'action du superphosphate gypseux est très différente suivant la dose qu'on emploie, et probablement on obtiendrait de meilleurs résultats avec des doses plus fortes. « La litière de tourbe acide », qu'on prépare depuis peu et qui contient 2 à 3 p. 100 d'acide sulfurique, devrait aussi faire bon effet; mais on manque jusqu'alors sur ce point d'observations exactes.

La chaux caustique et la poudre de phosphate Thomas sont nuisibles. Il est vrai que la décomposition du fumier frais est retardée par elles, comme on le comprend d'après les résultats signalés précédemment (p. 187); mais celle du fumier déjà en train de se décomposer est considérablement activée (p. 190), si bien qu'une grande partie de la matière organique est perdue. De plus, dans ces circonstances, l'ammoniaque déjà formée est presque entièrement volatilisée ; car on sait que la chaux détruit rapidement ses combinaisons et met en liberté l'ammoniaque. Il n'y a qu'un cas où la chaux puisse jouer un rôle utile : c'est quand l'ammoniaque ne peut se volatiliser dans l'atmosphère à cause de la couverture de terre ou de tourbe; dans ces conditions, la chaux favorise beaucoup la nitrification de l'ammoniaque retenue par ces couvertures (p. 191). Le sulfate de chaux entraverait probablement la décomposition des matières organiques, mais pas notablement (p. 194).

Comme les cendres végétales sont formées en partie de carbo-

nates alcalins qui, on l'a montré (p. 185), accélèrent beaucoup l'oxydation des matières riches en carbone, elles provoquent une destruction rapide des matières organiques et leur emploi est par là contre-indiqué. Les carbonates alcalins, non seulement ne sont pas aptes à fixer l'ammoniaque, mais ils peuvent même amener sa volatilisation.

Les sels maintiennent le mieux les éléments humiques du fumier quand leur dissolution dans la masse atteint un assez haut degré de concentration. On peut employer n'importe quel sel, même le sel de cuisine, qui est utile encore par ses propriétés antizymotiques. Cependant il ne faudrait pas s'en servir trop largement, parce qu'il exerce facilement dans le sol une action nuisible sur la germination des graines et amène, dans les sols riches en chaux, la formation de composés (chlorure de calcium) nuisibles à la végétation. Il vaudra mieux en général, pour conserver les matières organiques du fumier, se servir de sels de potasse, qui sont d'ailleurs indispensables à la plupart des cultures. Il ressort des recherches de HOLDEFLEISS qu'ils sont éminemment aptes à retarder l'érémacausis dans les tas de fumier. Il en faut de $0^{kg},75$ à 1 kilogr. par tête de gros bétail, un peu moins pour un cheval.

Quand le fumier est couvert de terre, la perte en matière organique est, d'après HOLDEFLEISS, absolument la même que dans un fumier non mélangé, qu'il soit seulement mouillé par la pluie ou qu'il soit arrosé de purin.

Les indications précédentes doivent être modifiées à certains égards pour le fumier conservé à l'écurie. Quoique, même par ce procédé, il y ait une partie notable de la matière organique qui se volatilise, la perte est pourtant beaucoup plus faible que si l'on dispose le fumier en tas par couches successives. Dans les expériences de HOLDEFLEISS, la perte de matière sèche a été de 13 p. 100 environ dans le fumier à l'étable et de 30 p. 100 dans le fumier à l'air libre. En employant le superphosphate et le sel de potasse, la matière organique est restée presque intacte. Ce procédé se montre donc par là extrêmement utile et a par lui-même une si heureuse influence que, sans autre substance, on arrive à restreindre la perte en matière organique aussi bien que peut le faire l'addition la plus efficace sur

le fumier en tas. Souvent, on pourra très bien se passer d'employer des moyens chimiques, notamment là où il s'agit plus de l'influence nourrissante du fumier et où l'on s'inquiète moins de l'action qu'il exerce sur les propriétés physiques. Si l'on veut cependant satisfaire à des exigences assez élevées à cet égard, on arrivera au but en ajoutant du superphosphate ou du sel de potasse à dose moitié ou aux trois quarts moindre de celle qui est nécessaire pour la conservation du fumier sur les places à fumier.

Quant à la fixation de l'azote dans le fumier à l'étable, les procédés de conservation (superphosphate gypseux et sels de potasse) n'ont pas, dans les essais de HOLDEFLEISS, produit de meilleur effet que si l'on n'ajoutait rien. Dans tous les cas les taux d'azote concordaient presque complètement.

Mais il y eut quelques différences dans les combinaisons sous lesquelles l'azote se présentait dans les diverses masses traitées. Sous l'influence du sel de potasse il ne s'était formé, comme à l'air libre, que des traces d'acide nitrique, mais d'assez fortes doses d'ammoniaque. Le superphosphate gypseux a différemment agi, suivant que le fumier était plus ou moins compact. « Quand le fumier à l'étable était piétiné constamment par de lourdes et grosses bêtes occupant toutes les stalles, la nitrification était très faible, sans être supprimée, que l'on ajoute ou non du superphosphate gypseux. Mais, quand le fumier n'était pas suffisamment piétiné, qu'il n'y avait que de jeunes bêtes dans l'écurie et en nombre insuffisant, il se formait d'assez fortes doses de nitrates. »

De ce que nous venons de dire, il ressort suffisamment qu'il y a avantage à laisser le fumier sous les bêtes plutôt que de le transporter à l'air libre. Si l'on considère en outre que, dans le premier cas, il faut toujours entretenir le tas de fumier et la fosse à purin, que l'on évite la perte de purin par évaporation et les travaux de vidange, d'épandage et d'arrosage du fumier, on reconnaîtra que la conservation du fumier à l'écurie est préférable à tout autre procédé. Mais il faut remarquer que les écuries où le fumier peut rester sous les animaux doivent être pourvues de certains dispositifs[1] qui

---

1. F. ENGEL, *Handbuch des landwirthschaftlichen Bauwesens*, Berlin, 1895, p. 301.

ne peuvent guère s'installer que dans les écuries nouvellement construites. C'est pourquoi on est forcé le plus souvent d'entasser, comme on l'a fait jusqu'ici, le fumier sur une place spéciale.

Les moyens de conservation employés dans l'écurie peuvent-ils nuire au bien-être des animaux? Constatons d'abord à cet égard que le superphosphate gypseux et la litière de tourbe acide (avec 2 à 3 p. 100 d'acide sulfurique) n'est nuisible en aucune façon, d'après les essais pratiques précédents, à la peau, ni au pis, ni au sabot, ni au pied des animaux, mais que des accidents de ce genre peuvent arriver par l'emploi des sels de potasse. Par exemple, quand les bêtes ont faim de sel, elles mangent avec avidité le fumier assaisonné de sels de potasse, ou bien des parties sensibles peuvent être irritées. Pour parer à ces inconvénients, il semble logique de vider les écuries le plus souvent possible et de ne mélanger le sel que sur la place à fumier. Dans les cas où le fumier reste sous les animaux, on éloignera le plus facilement l'inconvénient signalé en ne répandant la paille qu'après avoir répandu le sel, pour que celui-ci soit aussitôt recouvert et ne touche pas le corps des animaux. Il faut prendre pareille précaution sur les tas de fumier si on y lâche les animaux pour les piétiner; après les avoir saupoudrés de sel, on les recouvrira d'une couche de fumier frais.

De l'ensemble des observations précédentes, on peut tirer les conclusions suivantes importantes pour la pratique :

1° Le fumier laissé tel quel subit en se décomposant une perte en matière organique, perte variable avec la durée et le mode de conservation. Elle est d'autant plus forte que le fumier est plus vieux; elle est beaucoup plus importante (30-60 p. 100) quand le fumier est mis en tas dehors que s'il reste à l'étable (13 p. 100). Dans le premier cas, avec la matière organique disparaît une partie de l'azote, surtout par volatilisation du carbonate d'ammoniaque qui se dégage des éléments azotés de l'urine, tandis qu'en laissant le fumier sous les animaux, la diminution de l'azote est réduite à son minimum. Par les deux méthodes de conservation la nitrification se fait très difficilement. Il ne se forme des quantités notables d'acide nitrique, quand le fumier reste sous les bestiaux, que s'il est insuffi-

samment piétiné par un trop petit nombre de jeunes animaux de faible poids ;

2° Les acides minéraux (acide sulfurique, chlorhydrique) exercent une action retardatrice sur la décomposition du fumier si cette addition lui donne une réaction acide ; ils sont surtout propres à fixer l'ammoniaque. Seulement, il y a un obstacle à leur emploi dans la pratique ; c'est qu'ils sont dangereux à manier et qu'ils corrodent les parois des rigoles et des fosses à purin ;

3° En mêlant à du fumier frais de la chaux caustique ou des substances qui en renferment (phosphates Thomas en poudre), on suspend vraisemblablement la décomposition des matières organiques, tandis que cette opération la favorise si le fumier est en train de s'altérer ; elle favorise aussi la déperdition d'ammoniaque parce que la chaux met en liberté l'ammoniaque déjà formée. C'est pour cela qu'on doit rejeter ces matériaux quand il s'agit de la conservation du fumier ;

4° L'emploi de carbonates alcalins sous forme de cendres accélère probablement la décomposition du fumier et les pertes d'azote ; il faut donc y renoncer ;

5° L'action du gypse sur la fixation de l'ammoniaque est en général insuffisante ; peut-être suffit-elle si le sulfate de chaux est à grain très fin et si son action est prolongée. Celle-ci se manifeste par une faible diminution des éléments carbonés du fumier et par l'aide qu'elle fournit à la nitrification ;

6° Le superphosphate gypseux, avec un taux élevé d'acide phosphorique libre et de phosphate monocalcique importe pour la conservation du fumier en ce sens qu'il influe de la manière la plus parfaite sur la fixation de l'ammoniaque, entravant sa formation et accélérant la nitrification ; par contre, il ne peut faire sérieusement obstacle à l'oxydation des principes hydrocarbonés du fumier. On atteint mieux, quoique insuffisamment, ce but si la quantité employée dépasse les limites paraissant raisonnables dans la pratique agricole. A la place du superphosphate gypseux, on peut employer avec un égal succès du superphosphate à dose assez forte. Le phosphate de chaux précipité (phosphate dicalcique) est à rejeter pour la fixation de l'ammoniaque et ne doit exercer non plus

aucune influence sur la décomposition des matières organiques du fumier ;

7° Par le mélange de sels solubles (sels de potasse[1], chlorure de sodium, etc.), en quantités suffisantes pour que leur solution ait une concentration assez élevée, la décomposition des matières organiques du fumier, la formation d'ammoniaque et d'acide nitrique sont considérablement ralenties; mais on n'est pas sûr d'empêcher la volatilisation de l'ammoniaque. Le fumier obtenu est plus pailleux et, sauf les sels ajoutés, il est relativement pauvre en principes nutritifs solubles ;

8° Quand le fumier reste sous les animaux, il y a moins d'importance à se préoccuper des moyens de conservation ; on peut, sans inconvénient, les négliger si le fumier est fortement piétiné par des animaux lourds et en nombre suffisant; mais ils sont nécessaires dans le cas contraire ;

9° Un fumier couvert de terre se comporte au point de vue de la décomposition comme un fumier non traité ; mais il s'en distingue essentiellement en ce qu'il conserve presque entièrement son ammoniaque et offre les circonstances les plus favorables à une nitrification intense. Pareil effet pourra être provoqué par la litière de tourbe, qui possède à un haut degré le pouvoir d'absorber l'ammoniaque, surtout si elle est imprégnée d'acide sulfurique. Dans ce dernier cas, il doit y avoir aussi diminution dans la décomposition des éléments carbonés. Le fumier couvert de terre est, il est vrai, relativement pauvre en principes formateurs de l'humus, mais il est riche en éléments nutritifs solubles facilement assimilables, tant azotés que minéraux (voir *Note L*).

Ce qui précède indique nettement à l'agriculteur quels sont les moyens à sa disposition pour arrêter les pertes d'azote inévitables avec les procédés actuels de conservation des fumiers et pour agir sur l'érémacausis. Il fixera naturellement son choix d'après les circonstances locales. Dans les cas où on peut installer les dispositifs nécessaires, on aura toujours les plus grands avantages à laisser le fumier sous les bestiaux. Dans les autres, on emploiera l'un des procédés pratiques pour le traitement du fumier en tas et il faudra tenir

1. Kaïnite, krugite, carnallite, sulfate brut de potasse et de magnésie, etc.

compte tant de la nécessité de l'adjonction de tel ou tel principe nutritif que de l'influence de la fumure sur les propriétés physiques du sol.

Quant à ce dernier point, il est important de savoir si le fumier doit être employé dans un état plus ou moins décomposé suivant les cas. Pour cela, il faut avant tout considérer la manière dont se comportent les matières organiques dans des sols de composition physique différente (p. 209). Dans les terrains tels que les sols compacts, où l'érémacausis est lente, un fumier peu décomposé n'aurait qu'une faible action. En général, il faut y mettre des fumiers *faits,* bien pourvus de principes nutritifs assimilables. Mais la décomposition ne doit jamais être arrivée jusqu'à l'état *graisseux,* parce que l'apport de matières humifiantes si importantes pour de tels sols serait insuffisant (p. 392). Le degré d'érémacausis auquel on doit employer le fumier se mesure du reste d'après le taux du sol en matière organique ; le fumier traité avec de la terre convient pour les sols riches et les sols humiques (tourbières), et celui qui est traité au superphosphate pour les sols pauvres en humus.

Les terrains sablonneux, légers, où l'érémacausis est très intense, où la présence de grandes quantités de principes nutritifs amène facilement des pertes importantes par lixiviation, auront avantage à recevoir un fumier peu décomposé tel que celui qui est resté sous les animaux ou celui qui est traité aux sels de potasse. L'objection, plusieurs fois soulevée, qu'il manque à de tels sols l'humidité nécessaire pour une décomposition intense du fumier pailleux, n'est pas fondée si l'on prend soin par un traitement rationnel de restreindre l'évaporation (p. 468) et si le fumier est enfoui assez profondément. Il n'y a pas à craindre alors que les sels de potasse empêchent la décomposition du fumier enfoui ; car leur dissolution est assez diluée pour ne pas entraver l'érémacausis.

C'est par des considérations de ce genre qu'on résoudra la question de savoir quelles sortes de fumier doivent être employées sur les différents sols. Des fumiers chauds, se décomposant vite (fumier de cheval, de mouton), conviennent essentiellement aux terrains compacts et pas aux sols légers. Dans ceux-ci l'érémacausis serait si active, pour peu que les conditions fussent très favorables, que, dans

un temps relativement court, il se formerait de grandes quantités de principes nutritifs solubles qui seraient en partie perdus par lixiviation, vu le faible pouvoir absorbant et la grande perméabilité du sol. On ne peut parer à cet inconvénient qu'en se servant de fumiers froids, à décomposition lente (fumier de vache et de porc). Ceux-ci ne fourniraient, sur les sols compacts où toutes les matières organiques se décomposent lentement et dans l'intervalle où les plantes peuvent les utiliser, qu'une dose de principes nutritifs insuffisante à une végétation vigoureuse. Ces règles n'ont, du reste, aucune importance pratique parce que le plus souvent l'agriculteur n'a pas de choix à faire, les champs présentant rarement des différences telles qu'il soit nécessaire de séparer les diverses sortes de fumier. On sera d'ordinaire forcé, au contraire, pour obtenir un fumier aussi homogène que possible, de mélanger les fumiers, excepté ceux de mouton qui restent toujours dans les bergeries.

Le purin qui s'écoule du fumier provient originairement de l'urine des animaux, mais par son contact avec les éléments du fumier il subit maintes transformations chimiques en même temps qu'il se dilue par la pluie. Il est donc toujours plus aqueux et moins riche en azote et en potasse que l'urine. Il n'y a pas à tenir compte du taux insignifiant d'acide phosphorique qu'il renferme et qui provient de son contact avec les excréments solides. Donc potasse et azote sont surtout les éléments actifs de l'urine. La potasse est sous forme de carbonate ; elle ne subit aucun changement ; mais il n'en est pas de même des éléments azotés dont une partie se perd par volatilisation de l'ammoniaque et dégagement d'azote libre.

Pour obvier à ces pertes il y a divers moyens. D'abord on empêche la production de trop grandes quantités de purin en litiérant abondamment et en employant la tourbe. Si la litière ne suffit pas à absorber l'urine, les rigoles et les fosses à purin doivent être étanches et couvertes. On peut se passer de moyens chimiques (acide sulfurique, superphosphate, sulfate de fer, etc.) pour fixer l'ammoniaque et prévenir la fermentation si le fumier est mélangé à du superphosphate gypseux et si le purin est employé à arroser le tas de fumier. Il n'y a besoin de rien ajouter si l'on emploie de la litière de tourbe acide.

2. — Excréments d'oiseaux.

Citons d'abord dans ce groupe les *excréments des oiseaux domestiques* qui, d'après les analyses encore très incomplètes de A. Mayer et E. Heiden, ont à peu près la composition suivante :

	PIGEONS.	POULES.	CANARDS.	OIES.
	p. 100.	p. 100.	p. 100.	p. 100.
Eau.	62	59.7	53.0	82.0
Matière organique . .	31-32	29.4	40.0	14.0
Azote	1.2-2.4	0.8-1.4	0.8	0.6
Cendres	6-7	8.4	7.0	4.0

On voit que les excréments de pigeons et de poules sont sensiblement plus riches en matières organiques azotées que ceux des deux autres espèces. Il en est de même des principes minéraux, surtout des phosphates et même des sels alcalins. Ces différences s'expliquent aisément si l'on considère la nourriture de ces oiseaux. Puisque les pigeons et les poules se nourrissent surtout de grains riches en azote et en acide phosphorique, leurs déjections doivent nécessairement être plus riches en ces principes que celles des canards et des oies dont les plantes vertes herbacées constituent la principale nourriture. En conformité avec cette richesse en éléments azotés, la décomposition des excréments est plus rapide chez les oiseaux granivores que chez les herbivores.

L'azote s'y trouve en grande partie sous forme d'acide urique qui, par oxydation complète, se dédouble en urée et en acide carbonique et l'urée finalement se dédouble encore en acide carbonique et en carbonate d'ammoniaque.

Leur grande richesse en principes nutritifs facilement assimilables signale les excréments des pigeons et des poules comme des engrais concentrés qui, pour n'être pas nuisibles, doivent être seulement donnés à petites doses. Alors ils ont une action intense et rapide sur la végétation.

Vu la faible quantité qu'on en obtient dans les exploitations, on les emploie bien rarement seuls, tout au plus en horticulture. Ils sont particulièrement propres, comme ceux des canards et des oies,

à la fabrication des composts en les mélangeant avec divers déchets, au cas où on ne préfère pas les mélanger au fumier de ferme.

Au groupe dont il est question se rattachent les *déjections des oiseaux de mer,* déjections qui avec les cadavres de ces oiseaux et les détritus de poissons forment des couches épaisses dans les contrées à climat chaud et sec et sont vendues dans le commerce sous le nom de *guano*.

Puisque les oiseaux de mer se nourrissent de poissons, il est naturel que leurs excréments soient riches en éléments azotés et en phosphates et l'emportent beaucoup sous ce rapport sur ceux des pigeons et des poules. Ajoutons que, dans les circonstances actuelles, leur érémacausis est presque entièrement arrêtée puisque, par la forte insolation qu'ils subissent, ils se dessèchent vite et restent en cet état vu le manque de pluie. Cet engrais est donc richement doté en éléments nutritifs précieux et, par suite, ne peut être employé à fortes doses, pas plus que celui des pigeons et des poules.

Le tableau suivant, fait d'après les analyses de W. Ivison-Macadam[1], donne une idée de la composition de divers guanos :

	GUANO du Pérou.	GUANO d'Ichaboe.	GUANO d'Afuero. 1.	GUANO d'Afuero. 2.	GUANO d'Halifax. 1.	GUANO d'Halifax. 2.	GUANO d'Ascension.	GUANO de l'Ile des Pingouins.	GUANO de Patagonie.
Eau	12.5-17.0	6.1-22.1	12.2	16.9	16.5	16.6	6.7-11.0	19.5-21.8	10.6-21.2
Matière organique azotée et ammoniaque	15.4-43.7	28.9-38.4	33.1	26.8	38.6	40.1	27.5-36.8	17.7-21.0	21.6-34.0
Ammoniaque	3.7-13.4	8.1-12.8	9.2	7.4	11.9	12.8	8.8-12.3	4.7- 4.8	4.8- 6.2
Phosphates	10,1-36.1	3.4-33.7	32.7	31.7	12.0	9.4	21.9-34.2	16.1-19.2	19.4-29.1
Sels alcalins	7.0-16.3	2.8-11.0	17.4	19.6	10.1	8.4	2.8- 9.4	6.2- 7.2	5.6- 8.6

S'il pleut ou s'il y a des embruns, les déjections se décomposent rapidement, les éléments azotés et potassiques solubles sont dissous. Mais si le sol sur lequel reposent les excréments est calcaire, les phosphates solubles se transforment en phosphate tricalcique qui, grâce à son insolubilité, résiste à la lixiviation et se dépose en couches plus ou moins épaisses. Telle est l'origine des guanos d'appa-

1. W. Ivison-Macadam, *Journal of the Society of chemical Industry,* 1888.

rence pierreuse, rappelant les phosphorites, tels que les guanos de Baker, Phœnix, Lacépède, Avola, de l'île Humon, d'Ashmore, des îles Bahama et Guanahani. Ils renferment surtout du phosphate de chaux (53-79 p. 100) et n'ont qu'un faible taux de matières organiques azotées (1-14 p. 100).

Les éléments lessivés sont souvent entraînés par les flots, mais quelquefois ils restent sur place et forment une masse poreuse brune. Un exemple en est fourni par le guano de Mejillones qui contient environ 60.5 p. 100 de phosphate basique de chaux et 18 p. 100 de phosphate semi-acide de magnésie avec de petites quantités de matière organique.

On peut joindre à ce groupe d'engrais, à cause de l'identité de leur formation et de leur composition, les déjections des chauves-souris qui s'accumulent dans certaines grottes en grandes quantités et qui sont vendues sous le nom de *guano de chauves-souris*. Voici leur analyse d'après E. Heiden :

Eau.	13.3-23.4	p. 100.
Matière organique	56.5-73.0	—
Azote	9.4-12.3	—
Acide phosphorique	2.3- 3.2	—
Sels de potasse	1.6- 2.1	—
Ammoniaque	5.3-14.8	—

Les excréments des chauves-souris sont donc plus pauvres en acide phosphorique que ceux des oiseaux de mer, mais ils ont pour le reste une composition très voisine. Une plus ou moins grande partie des matières azotées et de l'urine se décompose aussitôt avec formation d'ammoniaque.

3. — Excréments humains.

Dans les excréments de l'homme comme dans ceux des mammifères domestiques qui ne donnent pas de produits animaux on retrouve, à l'exception d'une partie des matières non azotées qui est utilisée pour la respiration et qui se dégage sous forme de gaz (eau et acide carbonique), tous les principes non assimilés. Il en résulte que la composition des déjections humaines dépend entièrement de la nourriture ; celle-ci étant très variée, le taux des déjections en

principes nutritifs varie aussi. C'est pour cela que les moyennes d'analyses ne peuvent donner qu'une idée approchée de la valeur fertilisante des déchets humains. C'est avec cette restriction qu'il faut prendre en considération les chiffres suivants dus à J. H. Vogel[1].

Taux centésimal moyen des excréments humains à l'état frais.

	FÈCES.	URINE.	MÉLANGE.
Eau	77.20	95.50	93.70
Matière organique	19.60	3.30	4.90
Cendres	3.20	1.20	1.40
Azote	1.30	0.80	0.85
Acide phosphorique	1 16	0.16	0.26
Potasse	0.40	0.19	0.21

De nombreuses observations montrent que l'évacuation annuelle s'élève par tête à 438 kilogr. d'urine et à 48^{kg},5 de fèces. C'est donc l'urine qui constitue la majeure partie de l'engrais; elle renferme deux fois plus de matière organique, six fois plus d'azote, deux fois plus d'acide phosphorique et presque quatre fois plus de potasse que les déjections solides. Ajoutons que les éléments de l'urine sont directement assimilables ou se transforment facilement en combinaisons assimilables, tandis que les éléments non digérés et peu transformés qui se trouvent dans les fèces doivent subir toute une série de réactions avant de pouvoir être utilisés par les végétaux. Ceci n'est pas vrai seulement pour les principes minéraux, mais encore pour les matières organiques qui se rencontrent dans l'urine sous forme d'urée surtout et à bien plus faibles doses sous forme d'acide urique ou d'autres matières azotées, et dans les fèces sous forme de principes albuminoïdes et de leurs dérivés.

Quand les excréments sont conservés, par exemple, dans des fosses, leurs éléments organiques subissent des modifications parmi lesquelles la fermentation de l'urée est la plus intéressante, puisque, grâce à elle, il se forme beaucoup de carbonate d'ammoniaque volatil. Une partie des matières organiques est naturellement perdue par les réactions de l'érémacausis, tandis que les principes minéraux restent en admettant que les fosses soient bien étanches. L'engrais

1. J. H. Vogel, *Die Verwerthung der städtischen Abfallstoffe. Arbeiten der deutschen Landwirthschaftsgesellschaft,* fasc. II, Berlin, 1896, p. 15.

des fosses d'aisances, auquel se réunissent les eaux ménagères, aura une composition qui ne diffère pas essentiellement de celle des déjections fraîches. Les différences peuvent s'apprécier d'une manière approchée par les moyennes suivantes (d'après J. H. VOGEL) :

	EXCRÉMENTS FRAIS.	FOSSES D'AISANCES.
Eau	93.70	96.35
Matière organique.	4.90	2.77
Cendres.	1.40	1.39
Azote.	0.85	0.37
Acide phosphorique	0.26	0.16
Potasse	0.21	0.15

En rapportant au même taux d'eau, la perte en matière organique serait donc de 41.8 p. 100 et en azote de 55.3 p. 100. Souvent, surtout quand les matières sont conservées trop longtemps, la perte d'azote est encore plus grande ; elle peut aller jusqu'à 70 p. 100. En général, les récipients qui renferment les excréments ne sont pas étanches, si bien qu'une partie des liquides s'infiltre dans le sol et que des matières minérales sont ainsi perdues.

De quelle manière peut-on obvier à ces inconvénients? Cette question se lie étroitement à celle du meilleur procédé pour éloigner des villes les déjections humaines; elle est d'autant plus difficile à résoudre qu'à côté des intérêts de l'agriculture, visant surtout le transport commode de l'engrais si riche dont il est question, il y en a d'autres qui, se référant aux influences nuisibles de ces matières en putréfaction sur la santé publique, cherchent à éloigner les déjections humaines de leur lieu de production. Malgré d'incessants efforts et de nombreux essais, on n'est pas encore arrivé à trouver un système qui réponde parfaitement à tous ces desiderata. Il n'en paraît pas moins indiqué, vu l'importance du sujet, de faire connaître les considérations générales par lesquelles on jugera les méthodes employées en vue de l'obtention du résultat qui s'est montré jusqu'ici le plus favorable [1].

1. Pour le but que nous poursuivons, il suffit d'un court résumé des divers essais. Pour les détails, voir : E. HEIDEN, A. MULLER, K. VON LANGSDORFF, *Die Verwerthung der Städtischen Fäkalien,* Hannover, 1885. — J. H. VOGEL, *Die Verwerthung der Städtischen Abfallstoffe. Arbeiten der deutschen Landwirthschaftsgesellschaft*, fasc. II, Berlin, 1896.— A. MAYER, *Lehrbuch der Düngerlehre,* Heidelberg, 1895, p. 71.

Le système des fosses encore souvent employé est à rejeter aussi bien au point de vue économique qu'à celui de l'hygiène : il se perd ainsi beaucoup de matières nutritives et l'air comme le sol sont infectés. L'emploi de tonneaux ou tinettes est bien préférable ; l'infection du sol est supprimée ; celle de l'air n'a lieu que dans une faible mesure et l'engrais est plus riche en principes nutritifs que celui qu'on retire des fosses.

Pour obvier aux pertes d'azote il est bon de mélanger les déjections fraîches avec du terreau tourbeux (poudrette tourbeuse). Non seulement on les rassemble ainsi de la manière la plus parfaite et on empêche toute perte de substance, mais encore on écarte les inconvénients inhérents au système des tinettes (infection de l'air, etc.). On peut affirmer que ce procédé est le meilleur tant pour l'hygiène que pour l'utilisation économique des matières nutritives contenues dans les déjections humaines ; aucun autre n'est préférable (J. H. Vogel). Vu les frais élevés de transport de cette poudrette dans les champs, ce système n'est pas applicable aux grandes villes ; on le comprend aisément si l'on réfléchit que la production de poudrette croît tellement avec le nombre des habitants qu'il faut consacrer à son utilisation des régions toujours plus éloignées. Il mérite, au contraire, pour les raisons données, toute considération dans les pays plats et dans les villages ou les petites villes.

Au cas où, pour alléger le transport, les déjections sont réunies dans des tinettes sans aucun mélange, l'emploi du terreau de tourbe sera du moins à conseiller sur le lieu de vidange pour qu'on puisse manier les matières. La fabrication du compost de matières fécales exige des appareils mécaniques. Ceux qui ont été proposés par H. Classen d'Ansbach méritent particulièrement l'attention. S'il y a des germes de maladies dans les déjections, le terreau de tourbe acidulé par l'acide sulfurique tue vite et sûrement tous les microbes pathogènes et doit être employé de préférence à la tourbe ordinaire (p. 377).

Dans les grandes villes qui disposent de ressources plus grandes, les déjections humaines, diluées avec de l'eau, sont envoyées dans des canaux souterrains où elles sont entraînées par de l'eau courante qui les rend inoffensives et permet leur emploi agricole par épandage sous forme d'eaux-vannes à la surface des champs ou des prai-

ries. Quoique l'assainissement des villes puisse être parfaitement atteint[1] si les canaux sont soigneusement exécutés, l'excellence de ce procédé doit être mise en doute au point de vue agronomique.

Il y a tout d'abord à considérer que l'installation des canaux pour conduire les eaux-vannes sur les champs et l'acquisition des surfaces à irriguer exigent des dépenses qui ne paient pas leur rente, étant donnés les prix actuels des denrées agricoles, prix qui diminueront encore selon toute vraisemblance. Ajoutons qu'une grande partie des éléments azotés qui sont les plus précieux se perd par décomposition et que, la surface des champs d'épuration étant généralement beaucoup trop petite pour les matières à absorber, il y a un gaspillage extraordinaire de principes fertilisants et une saturation du sol qui retentit très désavantageusement sur la végétation des récoltes. C'est ce manque d'équilibre entre l'apport et l'utilisation qui, au point de vue agronomique, est le principal inconvénient de ce procédé, abstraction faite de tous les autres.

En prenant pour base une forte fumure (30 000 kilogr. par hectare) calculée pour trois ans, il faudrait environ 1 000 mètres cubes d'eaux-vannes pour faire l'équivalent; avec une fumure double qui paraît encore admissible si l'on veut obtenir des récoltes extraordinaires, il en faudrait donc à peu près 2 000 mètres cubes par hectare et par an; or, les champs d'épuration en reçoivent à Berlin quatre fois plus, à Breslau douze fois plus, à Danzig seize fois et demie plus, et à Paris vingt-cinq fois plus. Dans ces conditions la majeure partie des principes nutritifs, 75 p. 100 à Berlin, 92 p. 100 à Breslau, 94 p. 100 à Danzig et 96 p. 100 à Paris, n'est pas utilisée. En présence de ces chiffres on peut affirmer que ces champs d'épuration n'ont aucun but agricole; ils servent seulement à recevoir les eaux d'égout. D'autre part, si l'on voulait mettre fin à l'énorme gaspillage de matières nutritives précieuses, gaspillage équivalant presque au déversement des eaux d'égout dans les fleuves, et donner aux champs d'épuration une extension conforme à l'utilisation agronomique des engrais, la création de ces énormes surfaces de terrains filtrants au

1. G. W. Poore, *Ueber die Nachtheile einiger neueren sanitären Methoden*, Graz. 1892.

voisinage des villes offrirait souvent des difficultés insurmontables et provoquerait une telle augmentation de dépenses[1] que l'entreprise ne rentrerait pas dans ses frais.

Parmi les autres difficultés qu'offre le système de l'épandage des eaux d'égout, il faut compter la création d'un sol propre à la fois à entretenir les réactions de l'érémacausis et à absorber de grandes quantités de liquides. Les sols sablonneux conviennent seuls à cet usage parce que, seuls, ils permettent l'oxydation énergique des matières organiques et l'infiltration rapide des eaux-vannes. Tous les autres sols, à grains plus fins, n'absorberaient pas les quantités d'eaux d'égout que l'on emploie ; l'érémacausis serait empêchée et ce serait presque exclusivement la putréfaction qui entrerait en jeu. Aussi devra-t-on souvent renoncer, par suite du manque de sols ayant une composition convenable, à l'établissement de champs d'épuration pour l'utilisation des eaux d'égout.

Outre la saturation du sol par les matières nutritives, saturation nuisible à la végétation, il y a souvent cet inconvénient qui se présente sur un rayon plus ou moins grand en rapport avec l'eau d'égout, que les matières organiques solides en suspension sont retenues dans les pores du sol ; sa perméabilité pour l'air et l'eau, qui est sa principale qualité, diminue constamment. On peut remédier, il est vrai, à cet inconvénient en clarifiant les eaux d'égout avant de les épandre sur les champs ; mais l'installation des appareils nécessaires[2] exige des frais importants qui diminuent d'autant le rendement de l'entreprise.

En examinant ces divers points on pourra difficilement s'empêcher de reconnaître que l'épandage des eaux d'égout sur les champs ou les prés ne peut être préconisé au point de vue agronomique et vanté comme un moyen rationnel[3]. Si ce procédé doit être cependant maintenu à cause de ses avantages sous le rapport sanitaire, il faut

1. D'autant plus que le prix des champs à acheter est d'ordinaire très fortement majoré par les propriétaires.

2. J. H. Vogel, *loc. cit.*, p. 229.

3. C'est aussi l'opinion de M. Grandeau. Voir son article : *La fertilisation des champs par la désinfection des villes* (*Annales de la Science agronomique française et étrangère*, 5e année, t. I, p. 1-24). [*Traduction.*]

admettre que c'est exclusivement ce point de vue qui décide la question et nullement le résultat financier auquel on devra renoncer dans la plupart des cas. Cet inconvénient peut être d'autant mieux accepté que la santé de l'homme et les exigences de l'hygiène doivent sans conteste occuper la première place.

Quant au système de LIERNUR, intermédiaire, en quelque sorte, entre la canalisation et la vidange directe, c'est jusqu'alors à Amsterdam qu'il a été appliqué sur la plus vaste échelle. Les déjections, diluées par les eaux ménagères, de fabrique et de pluie, sont réunies dans des tubes en fer et sont poussées pneumatiquement sur un point où on les rassemble pour les travailler complètement. Malgré la perfection technique de ce système et ses avantages hygiéniques, il est peu employé, à cause des frais très élevés d'installation, d'une part, à cause aussi de la trop grande dilution des matières fécales.

Parmi les autres méthodes qui ont pour but de rendre les déjections inoffensives et de les faire en même temps servir à l'agriculture, sont surtout intéressantes celles qui transforment les matières en un engrais concentré commercial (poudrette) susceptible d'être transporté à longue distance. Bien que les nombreux essais faits dans cette voie n'aient pas jusqu'ici donné un résultat pleinement satisfaisant parce que l'évaporation de la grande quantité d'humidité qui imprègne les matières fécales exige des dépenses excessives, on doit espérer qu'on arrivera à résoudre ce problème d'une manière satisfaisante, d'autant plus qu'on a déjà pu surmonter en partie les difficultés. Ceci s'applique particulièrement au système de v. PODEWILS, à Augsburg[1], dans lequel les matières traitées par l'acide sulfurique en excès sont évaporées d'abord dans une bassine, puis dans un tambour-séchoir jusqu'à 20 à 30 p. 100 d'eau ; la dessiccation s'achève dans un concentrateur formé de trois bassines placées l'une dans l'autre. L'ancienneté de l'établissement de v. PODEWILS semble déjà montrer que la fabrication de la poudrette d'après ce procédé est rémunératrice ; on ne peut pourtant pas le savoir nettement, parce que la poudrette n'est généralement pas livrée telle quelle, mais en mélange avec divers engrais chimiques (superphosphate, sulfate

1. J. H. VOGEL, *loc. cit.*, p. 346.

d'ammoniaque, poudre d'os), sous la dénomination de guano fécal, superphosphate fécal, superphosphate ammoniaco-fécal, guano d'os fécal ; on ne sait si le gain ne doit pas être attribué pour la plus grande part à ces matières précieuses en mélange. Du reste, le taux d'eau des matières sert de mesure certaine à la rentabilité de ces entreprises. Le contenu peu dilué et peu décomposé des tinettes et des fosses s'adaptera incontestablement le mieux à la fabrication de la poudrette [1], tandis que les matières délayées et très fermentées, sans mélange d'eaux ménagères, dans le cas où la dilution ne dépasse pas 100-150 p. 100, sont plus rationnellement traitées par le sulfate d'ammoniaque [2]. Non seulement tous les faux frais doivent être couverts par la fabrication de ce dernier produit et de la poudrette, mais il doit rester un bénéfice suffisant, en supposant que la ville supporte les dépenses qui lui incombent et que les matières arrivent sans frais à la fabrique. Les déjections très diluées, telles qu'on les obtient dans le système de Liernur, ne semblent pas propres à la fabrication de la poudrette et tout au plus à celle des tourteaux de poudrette et de sulfate d'ammoniaque (voir *Note M*).

La fabrication de ces engrais, là où les matières sont amenées non ou modérément diluées, satisfait, non point parfaitement, mais suffisamment, aux exigences hygiéniques et économiques. Pour détruire sûrement les microbes pathogènes des matières fécales, il n'y a qu'à traiter celles-ci par le sulfate d'ammoniaque ou qu'à ajouter, lorsqu'on fabrique la poudrette, un excès d'acide sulfurique (voir *Note N*).

4. — Déchets d'origine organique.

Il y a un assez grand nombre de déchets qui se produisent, soit dans les exploitations agricoles, soit dans les industries annexes, telles que les abattoirs, les fabriques de conserves, etc., et qui sont utilisés comme engrais, soit directement, soit après avoir subi certaines préparations. Ces déchets sont d'origine animale ou végétale et peuvent dès lors être partagés en deux groupes.

1. Les matières fécales traitées par v. Podewils sont rassemblées dans des tinettes sans mélange d'eaux ménagères.

2. J. H. Vogel, *loc. cit.*, p. 392.

a) *Déchets animaux.*

Ceux qui proviennent des bêtes que l'on abat sont les plus importants. Ce sont les os, la peau, les poils, la corne, les sabots et une partie des intestins.

Les os consistent surtout en matières minérales où domine le phosphate de chaux, les matières organiques étant en faible proportion. Les os ne sont jamais employés bruts ; après avoir été torréfiés à haute pression, on les pulvérise ; souvent encore on enlève leur graisse avec la benzine et on les livre au commerce sous forme de poudre fine et sous le nom de poudre d'os torréfiés, ayant la composition suivante (d'après W. Ivison Macadam) :

Eau.	5.2- 9 8	p. 100.
Matière organique azotée . .	15.1-21.8	—
Azote ammoniacal	2.0- 3.6	—
Phosphates.	58.2-67.9	—
Carbonate de chaux	5.9-11.5	—
Sels alcalins	0.4- 0.9	—

Les matières organiques se décomposent facilement dans le sol humide (p. 165) et il se forme des quantités notables d'ammoniaque. Pour ce motif, il serait logique de n'apporter la poudre d'os que peu de temps avant la culture, s'il n'y avait d'autre part à considérer le phosphate de chaux, qui est l'élément le plus important. Comme il est difficilement soluble, son action dans ces conditions serait faible. Aussi doit-on donner la fumure de poudre d'os assez longtemps avant la semaille, donc déjà à l'automne pour les récoltes d'été, ou bien il faut la soumettre à une décomposition préalable si l'on veut qu'elle exerce une action rapide. Pour cela, on la dispose en tas dans lesquels les diverses couches minces qu'on applique successivement les unes sur les autres sont arrosées avec de l'eau ou du purin ; puis on les recouvre d'une couche de terre de 10 à 15 centimètres. Les matières organiques subissent alors une décomposition active, liée à l'échauffement de la masse, décomposition où l'ammoniaque se développe en abondance et où une partie du phosphate de chaux basique est dissous. Quand le tas est revenu à la température extérieure, on le mélange avec la couverture et on l'emploie comme

engrais. Ce mode de préparation de la poudre d'os est très à recommander si l'on veut obtenir avec elle une action rapide.

Les autres déchets de l'abat des animaux ont une composition très différente. La viande a un taux d'eau de 74 à 80 p. 100 et renferme surtout des matières organiques où dominent les principes albuminoïdes. Le taux de matières grasses est de 1 à 2.5 p. 100 et celui d'acide phosphorique de 0.5 à 0.7 p. 100. Le sang est riche en éléments azotés. Les formations épidermiques (poils, corne, sabot) consistent essentiellement en matières organiques riches en azote, tandis que, comme dans la viande et le sang, il y a peu de matières minérales. Les autres déchets, notamment la panse et les intestins, sont, comme engrais, d'une bien moindre valeur que les matières précédentes et même que le bon fumier de ferme.

La transformation de ces déchets en engrais commerciaux sera plus avantageuse déjà par ce motif qu'ils sont transportables au loin et qu'on est plus assuré de la mort des microbes pathogènes qui pourraient s'y trouver. Ceci est vrai surtout des déchets d'abattoirs et d'équarrissage, dont la meilleure utilisation est la transformation en poudrette en les traitant par 2 à 3 p. 100 d'acide sulfurique et en les évaporant à une température dépassant parfois 100°. La masse desséchée (poudrette), comparée aux déchets frais, présente, d'après une analyse de J. H. Vogel [1], la composition suivante :

	POUDRETTE.	DÉCHETS FRAIS d'abattoir.
	— p. 100.	— p. 100.
Eau	9.54	81.34
Matière sèche	90.46	18.66
Azote organique	1.68	0.50
Azote ammoniacal	0.64	0.04
Azote total	2.32	0.54
Acide phosphorique	1.23	0.31
Acide sulfurique	7.73	traces.

Il ne se produit pas de perte importante en principes nutritifs dans la transformation en poudrette, comme le montrent les chiffres suivants, pour le calcul desquels on a pris comme base un poids égal

1. J. H. Vogel, *loc. cit.*, p. 469.

de substance sèche en déduisant de la poudrette la quantité d'acide sulfurique :

	POUDRETTE.	DÉCHETS d'abattoir.
	p. 100.	p. 100.
Azote organique.	2.02	2.68
Azote ammoniacal.	0.78	0.21
Azote total.	2.80	2.89
Acide phosphorique	1.49	1.66

Les frais de fabrication sont couverts par la vente de la poudrette et, dans les circonstances favorables, il reste encore un bénéfice raisonnable. Dans la transformation des déchets d'équarrissage, le gain est d'autant plus assuré que l'on obtient encore la graisse comme sous-produit.

Parfois, avec les déchets des abattoirs ou des fabriques dans lesquelles on traite certains produits animaux (laine, baleine, etc.), on confectionne des engrais pulvérulents, tels que sang ou viande en poudre (guano de Fray-Bentos), corne en poudre, déchets de laine (Shoddy) et baleine en poudre. Ces engrais ont, d'après W. Ivison Macadam, la composition centésimale suivante :

ÉLÉMENTS dosés.	SANG en poudre.	GUANO de Fray-Bentos[1]	CORNE en poudre. 1[1].	CORNE en poudre. 2.	DÉCHETS de laine.	BALEINE en poudre[1]. 1.	BALEINE en poudre[1]. 2.
Eau.	10.56	8.6-10.9	11.32	15.81	7.92	6.72	5.16
Matière organique . . .	86.92	53.3-62.2	46.61	79.28	70.52	29.52	30.32
Azote ammoniacal . . .	17.21	7.4- 9.6	9.63	14.82	7.56	4.82	4.83
Sels alcalins	(Sels : 2.52)	0.8- 1.5	0.75	0 81	0.56	1.31	1.01
Phosphates	»	21.1-31.6	10.36	0.84	0.92	53.12	51.24
Carbonate de chaux . .	»	3.4- 4.7	6.61	1.95	5.51	7.82	4.76
Sable	»	»	»	»	10.58	»	»

1. En comparaison avec les matières brutes, les analyses du guano de Fray-Bentos, de poudre de corne et de baleine montrent un taux tout à fait anormal de phosphates qui ne s'explique que par un mélange de substances riches en acide phosphorique. Cette adjonction devait consister en poudre d'os comme on peut le conclure du taux élevé de ces engrais en carbonate de chaux.

Les deux premiers de ces engrais sont seuls employés directement ; les autres, à cause de leur lente décomposition, sont mieux utilisés en mélange avec d'autres déchets. Le guano de Fray-Bentos, préparé

avec les restes d'extraits de viande, peut être employé à l'état pur pour l'engraissement des porcs et trouver ainsi une plus haute utilisation.

Depuis peu, il apparaît sur le marché des engrais de grandes quantités d'un produit nommé *guano de poisson*, préparé avec les déchets de divers poissons de mer (sardines, harengs, morues, cabillauds, etc.) ou avec des animaux entiers (harengs, crabes). Ces engrais sont caractérisés par leur forte teneur en matières organiques azotées et possèdent encore d'importantes quantités de phosphates, comme le montrent les analyses suivantes de W. Ivison Macadam et E. Heiden[1] :

ÉLÉMENTS DOSÉS.	GUANO de poisson de Norvège.	GUANO d'anchois.	GUANO de hareng.	GUANO de morue.	GUANO de poisson d'Écosse.	GUANO de poisson de France.	GUANO de Crangon
Eau	6.1-10.7	8.06	6.14	6.24	22 9-42.9	1.0	?
Matière organique azotée	42.7-76.0	66.18	70.18	57.68	24.3-47.0	80.0	69.21
Azote ammoniacal	5.2-11.8	8.62	10.42	10.13	3.1- 5.2	14.6	12.10
Sels alcalins	0.6-10.9	4.54	1.56	2.12	6.6-15.3	?	?
Phosphates	12.9-29.4	11.92	7.92	26.17	7.2-19.0	11.1	5.26
Carbonate de chaux	3.1-24.3	3.28	3.68	6.35	1.9-23.7	0.06	6.32

Les substances organiques de ces engrais se décomposent relativement vite et on peut les employer directement comme les poudres de sang et de viande. Leur action est d'autant plus sensible qu'elles sont à grain plus fin. C'est sur les sols légers qu'elles ont le meilleur effet et on doit les enterrer profondément parce que les plus gros morceaux sont déterrés par les corbeaux et les chats attirés par l'odeur. Étant donné que l'action de ces engrais ne s'étend pas à de grandes distances, il est bon de les mélanger au sol à l'aide d'un extirpateur.

Les déchets de cuir, vu leur extraordinaire résistance à la décomposition (p. 164), ne peuvent être employés comme engrais qu'après avoir subi une préparation. On les fait bouillir à haute pression, puis on les dessèche et on les broie. Le cuir en poudre ainsi préparé, contenant environ 9 p. 100 d'azote et 17 p. 100 de phosphate, se décompose néanmoins encore si lentement qu'il vaut mieux le mettre d'abord en compost.

1. E. Heiden, *Lehrbuch der Düngerlehre*, Stuttgart, 1868, vol. II, p. 287.

Enfin sont propres à la fabrication de composts les hannetons, larves, etc., préalablement tués dans l'eau bouillante. Ils sont riches en principes azotés parmi lesquels la chitine, difficilement altérable, entre, chez les hannetons, pour une forte proportion. L'emploi de la chaux vive sera ici utile pour les raisons déjà indiquées à propos des produits cornés.

b) *Déchets végétaux.*

Les déchets végétaux obtenus dans les exploitations et les industries annexes trouvent leur meilleur emploi dans les composts (p. 578). Les mauvaises herbes, qu'on amasse parfois en grandes quantités, doivent être mises fraîches, si c'est possible, sur les tas de composts, en admettant qu'elles ne portent pas de graines, parce qu'elles se décomposent bien plus vite ainsi que sèches (p. 165). Les balayures des granges et des greniers qui sont d'ordinaire très riches en semences de mauvaises herbes doivent, avant d'être portées au tas, être versées et agitées dans l'eau bouillante pour détruire la faculté germinative de ces semences. Mais, comme ce moyen n'atteint pas toujours le but et exige des frais supplémentaires non justifiés par la valeur fertilisante des matières en question, il vaut mieux et il est plus sûr de les jeter au feu. Sur les bords de la mer, les tangues et les algues appartenant aux familles des fucoïdées et des floridées, de même que les zostères, sont utilisées pour la fabrication de composts actifs. Voici, d'après les analyses de A. von Sengebusch[1] et de A. Mayer[2], la composition de ces plantes :

Dans cent parties de matière sèche.

	ZOSTERA maritima.	FUCUS vesiculosus.	ALGUES de la mer du Nord.
Matière organique . . .	85.11	79.28	83.77
Azote	2.56 1.57	0.88 0.42-2.43	1.06
Acide phosphorique . .	0.87	1.21	0.17
Potasse	2.88	2.08	0.86

1. A. von Sengebusch, *Deutsche landwirthschaftliche Presse,* 1894, n° 94, p. 879.
2. A. Mayer, *Lehrbuch der Düngerlehre,* Heidelberg, 1895, p. 102.

Les plantes marines ont donc une composition variable et ces variations tiennent à la plus ou moins grande quantité d'animaux marins qu'elles hébergent. Mais on peut dire qu'en gros elles constituent un fumier riche en éléments azotés et possédant en outre un taux assez élevé de potasse et d'acide phosphorique. Ici, encore, il sera avantageux dans la préparation des composts d'employer ces plantes à l'état frais en tenant compte de ce que les algues et les tangues se décomposent plus vite que les zostères.

La plupart des déchets qui se produisent dans les industries annexes de l'agriculture sont plutôt employés comme fourrage que comme engrais. C'est seulement quand ils ne peuvent servir au premier usage, parce qu'ils sont avariés ou mélangés à des substances nuisibles, qu'on les utilise comme engrais. C'est ce qui arrive, par exemple, pour les drèches et les tourteaux de colza gâtés, les germes de malt salis, les déchets de féculeries, etc. Quant aux déchets des sucreries, des distilleries de vin et de fruits, des huileries et des manufactures de tabac, etc., ils ne peuvent servir que d'engrais et sont le mieux utilisés en composts. Le tableau suivant, d'après E. Wolff et E. Heiden, donne une idée de la composition centésimale de ces matières :

ÉLÉMENTS dosés.	TOURTEAUX			DRÈCHES.	GERMES DE MALT.	DÉCHETS des féculeries.			DÉCHETS		
	de colza.	de lin.	de pavot.			Pomme de terre.	Maïs (1/2 sec.)	Riz (pressé.)	des sucreries.	des raffineries d'huile[1].	des manufactures de tabac.
Eau	10.40	11.80	10.70	76.10	11.80	86.00	40 80	55.80	43 3	12 0	32 2
Matière organique . .	81.90	70.90	78.10	23.60	80.60	13 60	58.50	43.60	15.3	23 8	10 6
Azote	4.65	4.56	4.67	0.78	2.49	0.13	1.79	1.97	0.4	0.7	0.3
Acide phosphorique .	1.84	1.57	2.90	0.39	1.24	Cendres	Cendres	Cendres	1.2	3.6	0.8
Potasse	1.19	1,21	0.21	0.01	1.41	0.4	0.7	0.6	0.2	»	1.8

1. Avec un taux d'huile de 23.5 p. 100 et 27.7 d'acide sulfurique.
2. Il y a 38.51 de sable et d'argile.

L'érémacausis dans toutes ces matières est assez rapide. Les chiffres précédents donnent une idée suffisante de la proportion de principes nutritifs assimilables qu'elles contiennent.

5. — Composts.

La fabrication des composts a pour but de faire passer à l'état assimilable les principes nutritifs contenus dans les divers détritus d'origine organique. On y arrive en les mettant dans des conditions où elles subissent une décomposition plus ou moins intense suivant leur aptitude à cet égard. Étant donné que les détritus ainsi traités se putréfient surtout dans les derniers stades et qu'il se perd alors d'assez fortes quantités d'azote sous forme d'ammoniaque, on emploie pour les composts de la terre et, de préférence, une terre humique (terre de limon ou de tourbe) grâce à laquelle la masse reste accessible à l'air dans certaines limites en même temps que l'ammoniaque est protégée contre l'évaporation et qu'on obvie aux pertes en matières minérales solubles qui pourraient avoir lieu par lixiviation.

En général, on fabrique les tas de façon que les divers détritus soient disposés par couches alternant avec la terre. Quand le tas est achevé, on le recouvre d'une couche de terre de 30-40 centimètres qui sert à absorber l'ammoniaque et à empêcher le dessèchement. Au cas où le compost doit être transporté l'hiver sur les prés, il faut, pour empêcher la gelée de pénétrer, le couvrir de matières mauvaises conductrices, telles que pailles, fanes de pommes de terre, chiendent, ramilles, etc.

Pour entretenir les réactions dans la masse, il faut la maintenir quelque peu humide et perméable. Dans ce but, on humecte le tas avec de l'eau ou du purin ; quand il est bien préparé, c'est-à-dire qu'on a employé de la terre fine (curures de fossés, boues de route, limon de ruisseaux ou d'étangs), et quand on l'a laissé intact assez longtemps, on le change de place. Cela se fait en l'entamant verticalement et en le remettant à nouveau en couche près de l'endroit précédent.

Par ce traitement, les détritus animaux et végétaux subissent dans le tas une érémacausis dans laquelle les matières organiques se volatilisent en grande partie et les principes azotés et minéraux passent peu à peu à l'état assimilable. Ces combinaisons solubles sont absor-

bées par les particules terreuses et on obtient finalement un mélange richement pourvu d'éléments humiques et de principes nutritifs solubles, c'est-à-dire un compost ou fumier mélangé. Les réactions sont considérées comme terminées quand les restes organiques incorporés ne sont plus reconnaissables.

A cause de la différence que présentent les détritus dans leur aptitude à la décomposition, il est rationnel de faire plusieurs tas et de ne mettre dans chacun que les détritus dont l'altération marche du même pas. Cette mesure est recommandable parce que le compost a besoin d'un temps assez long pour mûrir, c'est-à-dire avant d'être employé et qu'il renfermerait les détritus à divers stades de décomposition si l'on voulait préparer les tas successivement à mesure que les matériaux se présentent. Aussi faut-il prendre soin d'avoir toujours plusieurs tas d'ancienneté (ou de maturité) différente. Ceux qui contiennent des déchets divers et ont, par suite, des taux différents de principes nutritifs, peuvent être mélangés avant l'emploi dès qu'ils concordent suffisamment par le degré de décomposition.

Il y a des détritus qui doivent subir une préparation avant d'être mis en compost. Ainsi, la chair des animaux abattus doit être d'abord séparée des os. Pour cela, on cuit les morceaux pendant deux ou trois heures; alors la chair se sépare aisément; on obtient ce résultat encore plus vite par la vapeur. La graisse qui surnage est écumée du bouillon qui sert ensuite à arroser le compost. Les os, à moins qu'on ne préfère les vendre, sont pulvérisés et cuits et on ajoute à l'eau, comme dans le cas précédent, un peu d'acide sulfurique. Les productions cornées sont aussi pulvérisées et traitées avec de la chaux fraîchement éteinte. On fera de même des hannetons qu'on dispose en couches minces sur le tas entre deux feuilles de chaux vive de 2 millimètres d'épaisseur. Pour faire les composts de gazon, on dispose les mottes par couches, les racines en l'air, et entre chaque couche on saupoudre de la chaux éteinte pour combiner les acides humiques et favoriser l'érémacausis.

Quand on aura des détritus qui dégagent beaucoup d'ammoniaque (déchets azotés), il pourra être bon d'employer des moyens de conservation (superphosphate gypseux, terreau de tourbe acidifié). Du reste, c'est le rapport entre la quantité de terre et celle des déchets

animaux et végétaux qui règle le sort des combinaisons formées dans la décomposition des éléments azotés des matières organiques (p. 148). Moins il y a de terre, plus il se forme d'ammoniaque, tandis qu'avec des proportions plus grandes l'ammoniaque formée nitrifie sur une plus grande échelle. On peut admettre, d'après P. Pichard, qu'avec 2 ou 3 grammes d'azote organique par kilogramme de matière, c'est surtout de l'ammoniaque qui se forme, tandis que si l'azote diminue jusqu'à 1 gramme par kilogramme, on a les conditions les plus favorables pour une nitrification énergique s'il y a suffisamment de chaux en présence. On peut donc influer à volonté sur la transformation des éléments azotés dans les composts; on peut, dans un cas, fabriquer un fumier riche en ammoniaque, et, dans l'autre, un fumier pourvu surtout de nitrates. Mais, en pratique, cette différence n'a pas grande importance parce que l'ammoniaque nitrifie assez vite dès que le compost est mêlé au sol. La production artificielle d'azote nitrique est, du reste, limitée et, dans l'espace de six mois, avec les meilleures conditions, elle ne s'étend qu'à la moitié de l'azote organique existant.

6. — Engrais verts.

La fumure en vert est le procédé qui consiste à incorporer au sol des plantes vertes non arrivées à maturité. En général, ces plantes sont cultivées dans ce but et enfouies sur place. Rarement on utilise dans ce but des plantes sauvages ou des plantes ayant crû ailleurs. La fumure en vert exerce une action sur la fertilité du sol en l'enrichissant surtout en matières organiques, formatrices d'humus et, là où les plantes sont enfouies, la lixiviation des principes nutritifs, surtout des nitrates, est arrêtée (p. 451 et 475).

La culture des plantes pour engrais vert se fait, soit comme culture principale, soit comme sous-culture, soit après la récolte principale (culture dérobée). Dans le premier cas, on sème au printemps, pour enfouir à l'automne et on renonce à toute autre récolte pendant la durée de la végétation. Dans les deux autres méthodes, cet inconvénient est évité, les plantes étant semées soit sous, soit entre celles de la culture principale ou seulement après la récolte princi-

pale[1]. Ce sont les conditions de végétation qui, dans chaque lieu, décident du procédé à employer. Dans un climat où les pluies sont irrégulières et sur un sol de faible faculté d'imbibition (sols sablonneux), le semis par-dessous n'est pas à recommander parce qu'il extrait beaucoup d'eau du sol et nuit ainsi à la récolte principale. Dans ces conditions, et surtout dans la culture extensive ou en dehors de l'assolement, le premier procédé donnera les meilleurs résultats et, en bien des cas, plus sûrs que la culture dérobée dont la réussite dépend de l'humidité qui reste dans le sol après la récolte principale ou des pluies qui ont lieu par la suite.

Le semis par-dessous ne convient qu'aux sols qui retiennent bien l'eau. Là où, par suite de circonstances favorables de sol et de climat, l'eau est en quantité suffisante ou bien là où il s'agit de limiter la dissolution des nitrates, le semis, après la récolte principale, doit être préféré à tous les autres procédés.

Pour obtenir le maximum d'effet de la fumure en vert, il faut que les plantes aient leur maximum de développement. Outre l'humidité, il y a à considérer la provision de matières nutritives, la façon de semer et le choix des plantes. Une fumure n'est nécessaire que quand les plantes sont cultivées dès le printemps. On donne alors au sol du phosphate Thomas en poudre et de la kaïnite, même de la chaux s'il en manque, pour développer vigoureusement les papilionacées dont la culture produit ici les plus grands avantages. Quand on sème sous la culture principale ou après sa récolte, on ne fume pas dans les exploitations rationnellement conduites, parce que la récolte principale a dû être assez richement dotée pour que les plantes vertes trouvent dans le sol ce qu'il leur faut. Quant à la façon de semer, remarquons avant tout que les plantes fournissent d'autant plus de matière organique que l'ensemencement est plus précoce et que le semis de graines mélangées, les unes à enracinement profond, les autres à enracinement superficiel, permet d'obtenir plus sûrement une récolte abondante que le semis d'une seule espèce.

Pour le choix des plantes destinées à être enfouies en vert, on don-

1. Schultz-Lupitz, *Zwischenfruchtbau auf leichtem Boden. Arbeiten der deutschen Landwirthschaftsgesellschaft*, Berlin. 1895.

nera généralement la préférence à celles qui ont la faculté de combiner l'azote atmosphérique, donc aux légumineuses. Sur les sols sablonneux légers on choisira en premier lieu le lupin jaune (*Lupinus luteus*), puis la serradelle (*Ornithopus sativus*), le pois d'Espagne (*Lathyrus clymenum*), la vesce velue (*Vicia villosa*), la minette (*Medicago lupulina*), le trèfle hybride (*Trifolium hybridum*) et aussi, suivant les cas, le pois (*Pisum sativum*); aux sols de compacité moyenne (sable lehmeux et lehm sableux) paraissent convenir le lupin bleu (*L. angustifolius*), le lupin blanc (*L. albus*), le pois, la vesce (*Vicia sativa*), la vesce velue, le *Pisum arvense;* enfin, aux sols compacts, la vesce, la fève de marais (*Faba vulgaris*) et aussi, d'après les recherches récentes, la vesce velue, le *Pisum arvense,* la minette, le trèfle hybride et le trèfle de Bokhara. On peut obtenir des données certaines sur la réussite de chacune de ces espèces par des essais en petit dont on doit d'autant moins se passer, si l'on veut se rapprocher le plus possible du but à atteindre, que, dans chaque exploitation, les règles générales relatives aux différences de végétation subissent de nombreuses exceptions. A côté des exigences de chaque espèce pour le sol et le climat, il faut, pour déterminer son choix, considérer la façon de semer et la durée de la saison de végétation. Ainsi, parmi les plantes citées, peu sont aptes au semis pardessous; celle qui convient le mieux est la serradelle, puis viennent les trèfles et, éventuellement, le lupin jaune. Pour le semis, après la culture principale, la considération déterminante est le temps qui s'écoule entre la récolte de cette culture et la semaille de la suivante. Les papilionacées répondent à toutes les exigences quand la récolte, comme celle des céréales d'hiver, colza, etc., est faite à temps ou quand le premier labour pour la récolte suivante ne doit se faire qu'au printemps; mais, à cause de leur croissance relativement lente, elles conviennent moins pour la fumure en vert dans les cas où la récolte a lieu à l'arrière-saison ou bien où le semis d'une récolte d'hiver doit s'exécuter à l'automne et où la jachère est courte (p. 472). Alors la culture de plantes à croissance rapide, bien que non fixatrices d'azote, offre plus d'avantage que celle des légumineuses, surtout s'il s'agit d'arrêter à bref délai la lixiviation des nitrates, c'est-à-dire de transformer les combinaisons azotées solubles du sol en

principes organiques moins solubles (p. 475). Parmi les plantes particulièrement utiles à ce point de vue, citons la moutarde blanche (*Sinapis alba*), la navette (*Brassica rapa oleifera*), le radis (*Raphanus sativus oleiferus*), la spergule (*Spergula arvensis* et *S. maxima*) et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*).

Les chiffres suivants[1] donnent une idée du poids vert à l'hectare de ces plantes et de leurs principaux éléments :

PLANTES.	POIDS VERT à l'hectare en quintaux.	100 PARTIES RENFERMANT EN MOYENNE			
		Eau.	Matière organique.	Azote.	Cendres.
Lupin jaune	120-140	85.0	14.3	0.67	0.7
Lupin blanc	150-300				
Vesce ordinaire	160-240	82.0	16.2	0.56	1.8
Vesce velue	160-320	83.3	15.5	0.69	1.2
Pois	120-240	81.5	17.0	0.51	1.5
Pisum arvense	120-240	83.2	15.6	0.56	1.2
Pois d'Espagne[2] . . .	100-250	77.6	»	0.83	»
Fève de marais	160-240	86.1	12.4	0.48	1.5
Serradella	120-300	81.0	17.2	0.59	1.8
Minette	80-180	80.0	18.5	0.56	1.5
Trèfle hybride	120-240	82.0	16.2	0.53	1.8
Trèfle de Bokhara . . .	160-320	87.5	10.4	0.46	2.1
Moutarde blanche . . .	120-240	82.7	15.9	0.34	1.4
Navette	160-200	85.9	12.8	0.45	1.3
Spergule	60-140	80.0	18.0	0.37	2.0
Sarrasin	100-240	85.0	13.6	0 38	1.4

Ces chiffres ne donnent pas, évidemment, de renseignements précis, d'autant plus que, dans ce tableau, on n'a considéré que la partie aérienne des plantes et non les organes souterrains également actifs, et aussi à cause du nombre insuffisant d'analyses exactes. Les poids de récolte se rapportent à des conditions de fertilité moyenne ; les limites supérieures sont assez souvent dépassées, et de beaucoup (de 50 p. 100 et plus), sur des sols riches soumis à une culture intensive, comme le montrent les résultats des essais faits à Lupitz.

La décomposition des engrais verts se fait généralement assez vite

1. Calculés sur les données relatives à la composition des fourrages inscrites dans le calendrier agricole de Mentzel et Lengerke d'après les tables de E. Wolff.

2. D'après J. H. Vogel ; comparez Schultz-Lupitz, *loc. cit.*

parce que les plantes sont enfouies à un degré de développement (floraison) où elles sont encore peu lignifiées et où la décomposition de ces matières organiques vertes est rapide. La température, cela va de soi, influe aussi sur ces réactions. Son action est, en général, défavorable, parce que les plantes vertes sont le plus souvent enfouies à une époque tardive et que leur décomposition doit se faire pendant les froids. Pour favoriser l'érémacausis, il est bon, d'après les expériences de SCHULTZ-LUPITZ, d'ajouter un peu de fumier de ferme à l'engrais vert, lorsqu'on l'enterre, si le terrain doit être occupé au printemps par des pommes de terre, par exemple. On fournit ainsi au sol un grand nombre de micro-organismes qui aident à la décomposition des plantes vertes.

On a dernièrement exprimé plusieurs fois l'opinion que l'enfouissement des engrais verts devait se faire dès la fin de l'hiver et l'on faisait valoir que les plantes prenaient, sous l'influence de la gelée, une consistance molle qui les appropriait mieux à leur enfouissement ultérieur ou bien que la couverture formée par ces plantes favorisait beaucoup la fermentation du sol. Pourtant, si l'on considère que le but principal de la fumure en vert est l'enrichissement du sol en matières humifiantes, on ne pourra prendre la défense de cette manière de voir; car, pendant l'hiver, une grande partie de la matière organique se détruit et il y a aussi, on peut l'assurer, une perte plus ou moins grande d'azote qu'on a tout intérêt à empêcher.

Ce procédé offre, en outre, cet inconvénient majeur qu'on renonce aux grands avantages que présentent le labour du sol à l'automne et l'action de la gelée sur lui pendant l'hiver (p. 468). De plus, comme le fait ressortir N. VON THUEMEN[1], en laissant les chaumes passer l'hiver, on favorise la multiplication des insectes nuisibles contre lesquels le labour du sol à l'automne est un bon moyen d'action. Si l'on remarque, enfin, que la transformation de l'azote des plantes vertes enfouies en azote nitrique a lieu, d'après P. P. DEHÉRAIN[2], seulement à la fin de l'été quand on enfouit au printemps, et déjà au printemps, au contraire, si l'on enterre à l'automne, on devra conclure qu'on

1. N. VON THUEMEN, *Deutsche landwirthschaftliche Presse*, 1895, n° 68, p. 616.
2. *Annales agronomiques*, t. XIX, 1893, p. 305.

ne peut attendre un effet complet des engrais verts que si on enterre les plantes à la fin de l'automne.

Lors de l'enfouissement des plantes vertes, surtout dans le cas où le sol doit être encore occupé à l'automne avec une récolte d'hiver, il faudra songer à recouvrir l'engrais vert d'une couche plus épaisse de terre pour que les plantes qui se développent ensuite ne souffrent pas du manque d'eau. Car l'ascension capillaire de l'eau des couches inférieures du sol est interrompue par les plantes enfouies[1], si bien qu'en l'absence de pluies après la semaille, la surface du sol peut éprouver un desséchement nuisible à la germination. Pour l'empêcher, il faut, surtout sur les sols légers, enfouir complètement et profondément l'engrais vert et comprimer fortement le sol à l'aide d'un pesant rouleau. Dans le sol ainsi traité, les plantes se décomposent mieux (p. 470), l'appel de l'eau vers la surface est plus facile et on pare mieux aux inconvénients relatifs à la germination qu'avec un état plus meuble du sol. Il faut, en outre, laisser le sol se reposer quelque temps après l'enfouissement avant d'ensemencer. Sur les sols compacts l'engrais vert, tout comme le fumier de ferme, doit être enterré plus superficiellement (p. 482).

Avec des plantes bien développées, il n'est pas besoin le plus souvent de les faucher et de les coucher dans le sillon avec des outils pour obtenir un enfouissement parfait. D'après N. von Thuemen[2], ce résultat est obtenu sûrement de la façon suivante, tout en éludant la fauchaison. Le champ est parcouru par un pesant rouleau lisse perpendiculairement aux sillons futurs; la charrue est munie d'un coutre circulaire mis en rotation par la marche de l'instrument et qui coupe net les plantes couchées en travers. Un autre procédé recommandé par l'auteur consiste à attacher l'une derrière l'autre deux herses de fer et à leur faire parcourir le champ dans la direction qu'auront les sillons. La première, munie à l'avant d'un bec rabattant les plantes, les presse sur le sol; la seconde les peigne et les prépare ainsi à l'enfouissement par la charrue.

---

1. Voir F. H. King, *Tenth Annual Report of the Agricultural Experiment Station of Wisconsin*, Madison (*Wisc.*), 1884, p. 194.

2. *Loc. cit.*

7. — Les détritus des récoltes.

Les détritus qui restent dans le sol (racines, chaumes, feuilles) sont des engrais organiques, puisque le sol éprouve par eux un enrichissement effectif en matières humifiantes et même en principes azotés s'il s'agit de légumineuses (p. 581). On peut aisément se convaincre de l'action fertilisante de ces détritus par un essai comparatif où, les laissant sur une parcelle, les enlevant sur l'autre, on cultive la même plante sur les deux. On obtiendra, dans le premier cas, de plus belles récoltes et, en étendant ces essais, on verra que les différences dans les produits varient suivant les plantes dont proviennent les détritus. Cela n'a rien d'étonnant si l'on considère que le développement des organes souterrains est très différent suivant les espèces et suivant la durée de végétation. Une expérience faite par H. Weiske[1], dont on verra dans le tableau suivant les principaux résultats, donne une idée approchée de ces différences.

PLANTES.	PAR HECTARE EN KILOGRAMMES.					
	Chaumes et racines.	Matières organiques.	Azote.	Matières minérales.	Potasse.	Acide phosphorique.
Blé	3 988	2 738	27,12	1 250	21,2	13,6
Seigle	6 038	4 148	75,12	1 890	36,0	29,2
Orge	2 284	1 848	26,40	436	11,2	13,8
Avoine	4 334	2 678	30,72	1 656	28,6	34,6
Sarrasin	2 518	1 984	54,96	534	10,6	12,6
Colza	5 114	4 400	69,84	714	54,2	36,8
Lupin	4 054	3 422	71,52	632	19,6	16,0
Pois	3 696	2 926	65,04	770	13,0	17,2
Serradelle	3 590	1 964	74,40	626	10,2	21,2
Anthyllide	5 740	4 622	117,36	1 118	29,8	27,6
Trèfle rouge	10 232	8 030	220,08	2 202	93,8	86,0
Luzerne	11 088	9 712	156,48	1 376	42,2	45,2
Esparcette	6 802	5 628	141,60	1 174	49,0	34,2

Ces restes végétaux contiennent donc des quantités assez importantes de matière organique et d'azote, beaucoup plus grandes chez les plantes pérennes que chez les autres (p. 265). On ne peut tirer

1. H. Weiske, *Die landwirthschaftlichen Versuchsstationen*, vol. XIV, 1871, p. 105.

de ces chiffres d'autres conclusions parce que les chiffres varient sûrement beaucoup suivant les circonstances locales.

Chez les plantes pluriannuelles (trèfles et herbes des pâturages) une plus ou moins grande portion des racines est décomposée au moment où l'on retourne le sol, puisqu'on sait qu'une partie de ces racines meurt chaque année. Elles ne subissent d'ordinaire qu'une décomposition lente et se transforment en matières humiques assez résistantes parce que le sol où elles se trouvent, n'étant pas travaillé, se tasse peu à peu et devient moins perméable. Aussi semble-t-il avantageux de fumer le sol avec de la chaux vive pour favoriser la décomposition des détritus en train de s'altérer; on favoriserait en même temps la nitrification de l'azote et l'assimilabilité des principes minéraux, ce qui rend le sol particulièrement apte à porter des céréales.

Le sol s'enrichit par les feuilles et tiges des plantes à bulbes et à racines comme par les racines et les chaumes des plantes à graines et des fourrages. Les chiffres suivants (calculés d'après E. WOLFF) montrent dans quelle proportion la fertilité du sol est influencée par ces détritus :

PLANTES.	FEUILLE et tiges en kilogr. par hectare.	PAR HECTARE EN KILOGRAMMES.				
		Matière organique.	Azote.	Matière minérale.	Potasse.	Acide phosphorique.
Pomme de terre. . .	4000- 8000	841.2-1682.4	19.6-39.2	78.8-157.6	17.2-34.4	6.4-12.8
Topinambour. . . .	4000-10000	742.0-1855.0	21.2-53 0	58.0-145.0	12.4-31.0	2.8- 7.0
Betterave.	6000-12000	482.4- 964.8	18.0-36.0	87.6-175.2	27.0-54.0	6.0-12.0
Carotte.	4000- 8000	616.4-1232.8	20.4-40.8	95.6-191.2	11.6-23.2	4.0- 8.0
Chou-navet	4000-10000	385 6- 964.0	13 6-34.0	78.4-196 0	11.2-28.0	8.0-20.0
Rave	4000-10000	360 4- 901.0	12.0-30-0	47.6-119.0	11.2-28.0	3.6- 9.0

Comparées aux végétaux du tableau précédent, les plantes à bulbes et à racines fournissent moins de matières organiques, azotées et minérales. Si l'action de ces détritus sur la fertilité du sol n'est pas meilleure, elle est du moins plus prompte que celle des plantes ci-dessus indiquées parce qu'ils se décomposent plus vite en raison de leur taux d'eau élevé.

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE L'ÉRÉMACAUSIS DANS LA CONSERVATION DES FOURRAGES

Presque tous les fourrages obtenus dans l'agriculture ou dans les industries annexes sont si aqueux qu'ils ne peuvent être conservés à l'état frais; ils sont trop exposés à la pourriture. Il faut employer certains procédés qui leur permettent de résister un certain temps aux agents extérieurs de décomposition.

Les méthodes employées pour la conservation des fourrages ont pour but, soit de les priver de l'eau en excès et de les faire passer à l'état de *foin sec,* soit de provoquer dans la masse fraîche des fermentations amenant la production de principes microbicides s'opposant à l'érémacausis (*foin fermenté*).

La dessiccation des fourrages verts s'obtient en les exposant, sous la plus grande surface possible, à l'air et au soleil et les protégeant contre une nouvelle humectation par la rosée ou par la pluie. Avec une température favorable, on obtient du foin dit *sec* ou *vert* qui contient, presque sans altération, tous les principes initiaux. Seuls, les trèfles très feuillés perdent beaucoup de feuilles quand on les retourne souvent; encore ces pertes peuvent-elles être évitées presque entièrement par le séchage sur des claies. Si ce procédé par dessiccation, pratiqué dans les conditions indiquées, répond à toutes les exigences et peut passer pour le plus convenable, il présente, quand le temps est humide et pluvieux, de nombreux désavantages; on n'obtient pas du tout ou seulement avec de grandes difficultés du foin sec par ce procédé; la pluie dissout plus ou moins d'éléments précieux ou même, dans les cas extrêmes, toute la masse pourrit.

Ce sont ces gros inconvénients qui ont amené à trouver des moyens de conservation permettant de soustraire les fourrages en tout ou en

partie à l'action des précipitations atmosphériques. Il était indiqué, pour hâter la dessiccation, d'utiliser la chaleur qui se développe spontanément dans les fourrages mis en tas. D'après un premier procédé inventé par T. J. KLAPMEYER[1], les fourrages, exempts de pluie et de rosée, sont mis en gros tas, en ayant soin de les bien presser couche par couche et on les laisse ainsi jusqu'à ce que la température du tas s'élève à 60°-70° ; alors on le bouscule et on étend le fourrage en une couche épaisse ; après refroidissement on le retourne et, s'il n'est pas encore assez sec, on le remet en tas. Le foin prend ainsi une couleur brune. Bien que le produit soit de bonne qualité, comme l'ont prouvé les recherches de H. WEISKE, la méthode de KLAPMEYER ne s'est pas répandue dans la pratique parce que, à l'entrée de la mauvaise saison, le séchage du fourrage est difficile et qu'il y a là un travail considérable. Il vaut beaucoup mieux préparer du *foin brun,* comme on le fait dans maintes régions à climat humide (îles, bords de la mer, montagnes) ; on évite ainsi les inconvénients précités. Le fourrage fané est disposé en gros tas par couches soigneusement pressées. Puis, pour empêcher la pénétration de la pluie, le tas est aussitôt recouvert d'une couche de paille suffisamment épaisse et laissé tel quel. Grâce à la forte chaleur qui se développe dans la masse, toute l'eau de végétation s'évapore et le foin, quand la réaction est terminée, est devenu complètement sec. Il a pris une couleur brune et une odeur de miel particulière.

Étant donné que la réussite de la préparation du foin brun dépend essentiellement du développement de la chaleur dans le tas, examinons de plus près les causes qui provoquent l'échauffement spontané du fourrage. On sait que dans la respiration des plantes et des animaux il y a absorption d'oxygène et dégagement d'acide carbonique. Cette réaction est masquée pendant le jour chez les plantes par un phénomène d'assimilation consistant dans l'absorption d'acide carbonique et le dégagement d'oxygène. Mais à l'obscurité, donc aussi chez les plantes encore vivantes entassées dans le tas, la respiration normale a son plein effet. L'oxydation du carbone, qui y est liée, engendre

1. T. J. KLAPMEYER, *Von Kleebau und Verbindung desselben mit dem Getreidebau,* Mietau, 1794.

nécessairement de la chaleur et c'est elle qui provoque d'abord l'élévation de température dans la masse des fourrages entassés ; car la transpiration qui empêche l'échauffement des plantes à l'air libre est ici extraordinairement diminuée. Dès que l'oxygène contenu dans la masse a été très réduit ou complètement utilisé par la respiration normale, il intervient à la place de celle-ci une oxydation, également liée à un dégagement d'acide carbonique, que l'on a désignée sous le nom de respiration intramoléculaire. Elle dure tant que les cellules végétales sont vivantes et se montre très énergique dans la masse déjà fort échauffée, parce que la température optima pour cette réaction est d'environ 40°, donc plus élevée que l'optimum de la respiration normale qui est de 25° à 30°. Dans les produits de cette dernière réaction on constate la présence de l'alcool. (Voir *Note O.*) Les réactions provoquées par la respiration intramoléculaire ne doivent pourtant pas être de longue durée, parce que, avec l'accroissement continu de la température, l'activité vitale des cellules est détruite, ce qui arrive vers 50°, sinon déjà avant. A mesure que les plantes meurent, la pullulation et l'activité de nombreux microbes préexistant dans la masse s'augmentent et il survient toute une série de réactions pour la plupart encore inconnues par lesquelles diverses combinaisons organiques, tant azotées que non azotées, passent à des formes plus simples en dégageant un certain nombre de calories. Avec la production de ces produits de fermentation qui, comme les acides, entravent l'activité et la multiplication des micro-organismes et notamment des bactéries, donc avec la diminution de l'énergie chimique de dissociation la fermentation diminue constamment jusqu'à cessation complète.

De ce qui précède il résulte que la température dans les tas de foin augmente d'abord jusqu'à une certaine limite, puis diminue jusqu'à ce qu'elle soit égale à la température extérieure. Le degré et la durée de l'échauffement dépendent de diverses conditions, surtout de la quantité et de la composition des plantes entassées, de la pénétration de l'air et des dispositions prises pour obtenir le dégagement de chaleur. (Voir *Note P.*)

En général, à conditions égales, l'élévation de température est d'autant plus grande que les tas sont plus gros et inversement. Cela

s'explique si l'on considère que l'action de l'air froid extérieur se restreint à mesure que le tas est plus volumineux.

Le dégagement de chaleur est en outre d'autant plus intense que l'activité vitale des cellules est plus grande, c'est-à-dire que les plantes sont plus fraîches et plus charnues ; car leur respiration sera d'autant plus énergique et il y aura une plus grande réserve de forces chimiques de dissociation. C'est pour cela que l'échauffement est faible quand les plantes ont déjà perdu beaucoup d'eau ou quand elles ont été lavées par des pluies répétées. Mais cela arrive aussi lorsque les fourrages sont chargés sur le tas, imprégnés de pluie ou de rosée ; les stomates sont obstrués par l'eau et la respiration se trouve ainsi diminuée. La chaleur qui se dégage dans ces conditions est insuffisante à évaporer l'eau en excès ; la masse reste dans un état plus ou moins mouilleux ; s'il y a manque d'air, elle subit la putréfaction ; si l'oxygène arrive abondamment, elle subit l'eremacausis avec production de nombreuses moisissures.

Du reste, l'échauffement est d'autant plus fort, toutes choses égales d'ailleurs, que les couches de foin sont moins pressées, parce que l'accès de l'oxygène est facilité d'autant. Il y a pourtant à considérer que les plantes riches en eau, quand elles ont péri par l'élévation de la température, sont destinées à l'érémacausis si elles sont en couches poreuses ; elles offrent une nourriture appropriée aux nombreuses moisissures qui se présentent et sont dès lors perdues. L'élévation de température dans les tas dépend enfin de leur protection contre le refroidissement. A conditions égales, les fourrages entassés dans un espace clos s'échauffent plus que ceux qui sont en plein air.

Des considérations précédentes sur les causes de l'échauffement spontané des fourrages mis en tas se dégagent quelques données pour le traitement le plus rationnel du foin brun.

Il y a du reste encore beaucoup de lacunes dans nos connaissances sur les processus intimes de l'échauffement, parce qu'il n'a été fait jusqu'alors aucune recherche systématique à ce sujet. Il faudrait avant tout établir pour une seule et même matière l'influence que la masse, son taux d'eau, son degré de pression exercent, soit par eux-mêmes et dans les complications possibles à ce point de vue, soit sur les propriétés chimiques du produit. A cet égard on ne pourrait ob-

tenir de données intéressantes pour la pratique qu'en déterminant la quantité des éléments qui se perdent. Des analyses de fourrages sur échantillons recueillis dans des conditions non déterminées ne suffisent évidemment pas à combler les lacunes dont nous parlons[1].

D'après ce que l'on sait actuellement, la préparation du foin brun ne réussit que dans le cas où le fourrage, lors de la mise en tas, est fané et fortement pressé, couche par couche. A l'état frais, l'échauffement semble être trop fort et la fermentation trop intense, inconvénient auquel on peut parer par une compression plus énergique que celle qui est possible par l'action des pieds. En aucun cas la température ne peut s'élever dans la masse à un point tel qu'on ait à craindre l'inflammation spontanée du foin, parce que l'eau est si abondante que la chaleur développée suffit seulement à l'évaporer. On a observé ce phénomène uniquement dans le cas de fourrages peu humides, presque séchés à l'air et mis en couches relativement perméables. Mais on ne sait pas encore nettement comment prennent naissance les hautes températures nécessaires pour produire l'inflammation. Les recherches de H. Ranke[2] ont bien montré qu'en chauffant du foin à 280°-320°, il se formait un charbon pyrophorique c'est-à-dire inflammable à l'air ; mais on ne sait pas du tout ce qui peut amener une telle élévation de température. En tout cas, il ne s'agit pas de processus de fermentation, parce qu'elle prend fin à une température beaucoup plus basse. Il ne reste que l'hypothèse de réactions purement physico-chimiques dans des circonstances données, ce qui n'avance pas beaucoup l'explication du phénomène.

D'autre part, on ne peut obtenir de foin brun normal avec un taux d'eau excessif comme il arrive quand les plantes sont imprégnées de pluie et de rosée ; dans ce cas elles sont pour la plus grande partie perdues, comme on l'a déjà dit. On peut donc seulement affirmer que, d'après l'expérience, les fourrages doivent, pour la préparation du foin brun, être employés fanés. Pour les mettre à cet état, il suffit, quand les andains sont secs par-dessus, de les retourner et de les

---

1. F. Falke, *Die Braunheubereitung. Arbeiten der deutschen Landwirthschaftsgesellschaft,* fasc. 9, Berlin, 1895.

2. H. Ranke, *Die landwirthschaftlichen Versuchsstationen,* vol. XVI, 1873, p. 347.

laisser exposés à l'air jusqu'à ce que le dessous soit aussi sec. Dans quelques contrées ces andains fanés sont mis en petits tas et y restent 1-2 jours avant d'être travaillés comme foin brun. La nécessité de faner avant de conserver est un désavantage quand le travail est interrompu par les pluies. Pourtant il est plus facile, dans un climat humide ou dans une période pluvieuse, de préparer les fourrages pour faire du foin brun que pour faire du foin sec.

L'expérience a montré que les dimensions les plus convenables à donner aux masses de foin brun sont 4 à 6 mètres de diamètre avec une hauteur de 4 à 7 mètres. Il n'est pas à recommander de les mettre dans des espaces clos, parce que l'eau, ne pouvant s'évaporer, se condense sur le foin et donne facilement naissance à de la pourriture ; de plus, il peut se produire un très fort échauffement par suppression du refroidissement par l'air extérieur.

Enfin, il faut avoir soin de comprimer les diverses couches le plus possible. Comme protection contre l'action nuisible de l'eau de condensation et de la pluie, il faut recouvrir la masse d'une forte couche de paille, mais ne pas la maintenir avec des poutres qui seraient une voie de pénétration pour l'eau de pluie ; mieux vaut employer de forts fils de fer tendus par des pierres.

L'échauffement et la fermentation de la masse durent de trois à cinq semaines, suivant les circonstances extérieures. Le refroidissement se fait lentement et ne se termine qu'au bout de dix à douze semaines. Selon la matière employée et son degré d'échauffement, le foin a une couleur qui varie du brun clair au noir. A conditions égales, les plantes qui se prêtent facilement à la compression (les graminées par exemple) se colorent plus que celles à tiges grossières (trèfles).

Mentionnons enfin un dernier procédé usité en Schleswig-Holstein et donnant un produit qui tient le milieu entre le foin sec et le foin brun. D'après F. FALKE[1], il se distingue parce qu'au lieu de gros tas on n'en fait que de moyens et les fourrages sont entassés quand ils ne sont pas encore complètement secs. « Quand le foin est fané pendant un à trois jours par la dessiccation en andains qui, avec des temps

1. *Loc. cit.*, p. 17.

favorables, ne sont retournés qu'une fois, il est mis en petits tas ; ceux-ci, au bout de deux à trois jours, sont réunis en de plus gros tas hémisphériques contenant la charge d'une voiture ou d'une voiture et demie. » Pour la conservation de la seconde coupe, les tas sont un peu plus gros et équivalent à quatre ou cinq petites voitures. A cause de la dessiccation déjà très avancée du foin, son échauffement ne peut qu'être faible. Le faible diamètre des tas permet une aération facile et un refroidissement plus prompt que dans les tas de plus forte dimension. Le produit obtenu ne peut généralement pas être exactement désigné sous le nom de foin brun. Il n'en a la composition que si les végétaux possédaient, lors de la mise en tas, un taux d'eau assez élevé ou une texture telle qu'ils pussent s'empiler en couches serrées. Ce dernier cas se présente pour la seconde coupe parce que les fourrages ne se fanent que difficilement et qu'ils s'entassent mieux, étant plus feuillés.

Comme la préparation du foin brun exige un fanage préalable et ne peut dès lors être toujours faite convenablement, on a cherché des méthodes qui permissent de conserver le foin à l'état frais et de le soustraire complètement aux influences atmosphériques. Telle est la préparation du *foin acide* qui se fait en empilant dans des silos secs, par couches fortement pressées, les plantes fraîchement coupées. Quand le silo est plein, on recouvre le tas d'une forte couche de terre dont on bouche soigneusement toutes les fentes à mesure qu'elles se produisent.

La masse ainsi traitée éprouve, il est vrai, par suite du dégagement d'acide carbonique, un échauffement, mais qui, vu l'absence complète d'air, n'approche jamais, même de loin, de celui qu'on constate dans le foin brun ; aussi l'évaporation de l'eau y est-elle moindre. Il s'y produit très vite, grâce aux micro-organismes, des fermentations donnant surtout naissance à de l'acide lactique et à des acides gras volatils (acides acétique, butyrique, valérianique, propionique, capronique, etc.). Aussi le produit devient acide et prend une odeur pénétrante, caractéristique du foin acide. La multiplication des champignons de la pourriture est entravée par ces acides et le foin à cet état peut se conserver assez longtemps.

On ne peut obtenir le foin acide que si le fourrage est aussi com-

primé que possible et s'il est soigneusement garanti contre l'arrivée de l'air et de l'eau de pluie ou de fond. Dans le cas contraire, il serait sûrement perdu. Si l'oxygène de l'air pénètre plus ou moins, les moisissures et le ferment de l'acide acétique gagnent la surface, tandis que la fermentation lactique est refoulée. Il se produit alors aussi une forte fermentation ammoniacale dont les conditions ne sont pas encore bien connues ; la masse prend une réaction alcaline et un état favorable à la pullulation de nombreuses bactéries putréfiantes. S'il arrive d'assez grandes quantités d'eau pour boucher les vides existant entre les plantes et pour fermer complètement l'accès de l'air, la pourriture progresse de dehors en dedans et le fourrage est perdu comme dans le cas précédent.

De ce que nous venons de dire résultent les précautions à prendre pour préparer du foin acide normal[1]. L'ensilage dans des espaces complètement imperméables est préférable à la mise en silos dans lesquels la garantie nécessaire contre l'air et l'eau est moins assurée. Par l'infiltration de l'humidité qui s'évapore, il y a souvent d'assez notables quantités de fourrage perdues, inconvénient complètement évité dans le premier cas. Des fosses revêtues de briques et enduites de ciment conviennent le mieux ; pour empêcher un trop fort échauffement dans le fourrage, elles doivent être aussi étroites que possible (2 mètres à 2m,50), mais profondes (2m,50 à 3 mètres) et longues. Les parois ont un léger fruit pour que le fourrage reste bien en contact avec elles lors de son tassement. Les fourrages à conserver sont entassés par couches dont chacune est fortement pressée et, en en outre, on les charge de pierres posées sur des planches. La surface des fourrages ainsi traités ne doit pas être mise de niveau avec le bord des fosses, parce qu'il se produirait dans le milieu de la chape de terre, par son tassement, une dépression où s'accumulerait de l'eau qui ferait pourrir le fourrage. Pour parer à cet inconvénient, il semble indiqué de donner à la surface du tas un fort bombement par lequel on prévient en même temps la production de

1. J. Kühn, *Das Einsäuern (Einmachen) der Futtermittel;* Mentzel *und* v. Lengerke's *landwirthschaftlicher Kalender,* Berlin, 1888, p. 31 ; E. Pott, *Die landwirthschaftlichen Futtermittel,* Berlin, 1889, p. 96.

fentes dans la chape, puisqu'à mesure que le volume diminue, elle devient plus serrée et plus compacte. Il faut du reste boucher toutes les fentes qui s'y produisent. La couverture de terre doit avoir une épaisseur de $0^m,60$ à $0^m,80$ et d'un mètre s'il s'agit de terre sablonneuse ; elle doit être appliquée par couches bien triturées formant une sorte de pisé.

On ne doit jamais employer la paille pour revêtir les parois des silos ou pour couvrir le tas (procédé qui est souvent employé dans les silos nus) parce que l'air enfermé dans la paille favorise la production dans le foin avoisinant d'acide acétique et de moisissures.

Certains fourrages, tels que le maïs, les betteraves, les pommes de terre, doivent être auparavant découpés pour pouvoir s'entasser convenablement. Souvent, en outre, on fait cuire les pommes de terre, précaution nécessaire quand elles sont gelées ou prêtes à pourrir.

Les réactions pour la formation du fourrage acide durent de six à huit semaines. Après ce laps de temps, on peut ouvrir la fosse et employer son contenu. Il faut prendre la précaution d'enlever la consommation journalière par tranches verticales et de garantir la surface nue par des bottes de paille ou des planches pour empêcher l'accès de l'air. Si l'on doit employer le foin acide régulièrement et en grande quantité, il est rationnel de faire des silos tels qu'ils puissent être consommés en quelques jours. On est sûr ainsi qu'une partie du fourrage ne sera pas perdue par moisissure.

En partant de l'idée que les microbes qui provoquent la fermentation spéciale du foin acide sont tués par les hautes températures, on a cru dernièrement pouvoir conserver les fourrages à l'abri de la fermentation en les laissant d'abord s'échauffer spontanément dans des tas faits à l'air libre et, après que les hautes températures ont agi un certain temps, en les soustrayant par énergique compression mécanique aussi complètement que possible à l'action de l'air[1]. On pensait obtenir avec cette opération un fourrage doux (sweet ensilage), sans acidité, dans lequel les éléments n'auraient subi que de

---

1. A. Goffart, *Manuel de la culture et de l'ensilage des maïs et autres fourrages verts*, Paris, 1877 ; G. Fry, *The Theory and Practice of Sweet Ensilage*, London, 1885.

faibles modifications ; l'événement a montré qu'on s'était trompé. Cependant on est arrivé par cette voie à une méthode qui, bien conduite, permet d'obtenir un fourrage dont la préparation offre en certains cas plus d'avantage que celle des fourrages déjà décrits.

Comment les microbes qui provoquent la fermentation des fourrages verts mis en tas sont-ils influencés par le procédé dont il est question et qu'on peut dénommer la préparation du *foin vert pressé ?* Avant d'entrer dans des explications à cet égard, il faut d'abord parler d'une recherche sur plusieurs points importants de laquelle nos connaissances offrent encore beaucoup de lacunes.

La fermentation lactique, on l'a montré au début de ce livre (p. 42), est provoquée par divers organismes qui ne sont pas essentiellement différents par leurs conditions de vie et de nutrition pas plus que par les produits qu'ils forment. On peut admettre cependant que le ferment lactique décrit par Hueppe, le *Bacillus acidi lactici,* est le plus répandu et contribue donc le plus à la fermentation en question. C'est un anaérobie facultatif et peu sensible à l'absence d'oxygène. Quant à l'influence de la température, on a trouvé que le bacille ne se multiplie pas au-dessous de 10° C, que sa température optima est de 30° à 45° et qu'il peut supporter 60° et plus sans périr. Pour la plupart des organismes producteurs d'acides gras volatils, les limites de température sont moins étendues. Ainsi le champignon aérobie de l'acide acétique prospère le mieux entre 18° et 35°, le microbe anaérobie de l'acide butyrique entre 35° et 40°, tandis qu'ils sont tués, le premier vers 50° et le second vers 60° ou peu au delà. Les microbes producteurs des autres acides gras se comportent de même.

Ces faits font pressentir les mesures à employer pour arrêter dans les fourrages entassés le développement des bacilles à l'activité desquels est liée la production des acides gras. Et pour se mettre dans les conditions d'une fermentation lactique aussi pure que possible, il est évident qu'il faut d'abord laisser s'échauffer les fourrages verts mis en tas peu serrés. Quand la température s'élève, les microbes des acides gras sont tués, tandis que le ferment lactique résiste. Après que l'échauffement a produit un certain temps son effet, si l'on comprime alors fortement le tas, la température s'abaisse néces-

sairement puisque l'air n'arrive plus que difficilement ; mais cette baisse se fait lentement, vu la mauvaise conductibilité des fourrages, et proportionnellement à la pression que l'on a fait subir à la masse. Il est ainsi possible de maintenir quelque temps la température au degré le plus favorable au développement du ferment lactique. Dans la masse pressée il doit donc se former une certaine quantité d'acide lactique, mais pas au delà d'un taux déterminé parce qu'il arrive finalement un moment où la pullulation des bacilles s'arrête à cause de l'augmentation d'acide lactique qui agit comme un poison. A côté de la fermentation lactique, il y a toujours encore quelques ferments d'acides gras qui agissent ; car le foin ainsi pressé contient toujours, outre l'acide lactique, un certain taux d'acides gras volatils, mais très faible en comparaison de celui du foin acide. La différence est manifeste dans les chiffres suivants, dus à G. Fry, relatifs à deux espèces de fourrages fermentés de trèfle incarnat :

La substance sèche renferme :

	FOIN PRESSÉ.	FOIN ACIDE.
	p. 100.	p. 100.
Acides volatils libres (calculés en acide acétique).	0.30-0.31	1.704
Acides libres non volatils (acide lactique). . . .	1.53-1.93	1.873

Suivant les circonstances extérieures, la composition du foin vert pressé est différente[1]. Une teinte vert clair, généralement accompagnée d'acides plus odorants, montre que la température n'a pas atteint les environs de 60°. Si la couleur est brune, c'est un signe que l'échauffement a dépassé les limites prévues. L'odeur du foin normal pressé est rapprochée de celle du pain, du miel, du gros pain bis, du tabac à priser, etc., tandis que le foin rendu acide par un échauffement insuffisant dégage une odeur semblable à l'odeur trop forte du foin brun ; elle chatouille et irrite la muqueuse nasale. Quant à la texture du fourrage, elle est peu modifiée si l'échauffement n'a pas dépassé la limite indiquée. Les exceptions aux faits précédents indiquent toujours des fautes dans la préparation du fourrage.

Le pressage du fourrage s'obtient le mieux par des appareils mécaniques, parce qu'avec eux la température se règle bien plus

1. F. Albert, *Untersuchungen über Grünpressfutter* (*Jahrbuch der deutschen Landwirthschaftsgesellschaft*, 1891, 1re partie).

facilement que dans les silos souterrains. Suivant la manière dont on exerce la pression, ces appareils se distinguent en deux groupes : les presses à action continue (presses automatiques) et les presses à pression variable (agissant non automatiquement)[1]. Les recherches de F. ALBERT n'ont pu établir la supériorité d'un système déterminé de presses.

Pour qu'on puisse songer à installer ces presses, il faut d'abord que la quantité de fourrage à conserver soit assez grande, parce que sa préparation ne réussit qu'à cette condition et que le déchet sur les bords, qu'on ne peut empêcher, serait trop grand par rapport à la masse. Comme quantité minima, F. ALBERT donne 30 000 kilogr. et G. CALBERLA 100 000. On n'est pas d'accord sur le taux d'eau avec lequel les plantes doivent être portées sous les presses. Les uns recommandent de les presser fanées, les autres aussi fraîches que possible. Comme F. ALBERT le fait remarquer justement, on doit, pour résoudre la question, tenir compte de l'état de la matière sous d'autres rapports, parce que le taux d'eau n'est pas seul décisif dans le cours des réactions de la fermentation. Des plantes à grosse tige, comme le maïs, qui permettent à l'air une large entrée dans la masse pressée pourront être employées avec un taux d'eau plus élevé que d'autres fourrages à tiges plus menues qui s'entassent plus vite et mieux. Si l'on a des matières trop aqueuses, on peut diminuer le taux d'eau en interstratifiant des matières appropriées, telles que de la menue paille ou de la paille. Du reste, un assez fort taux d'eau ne semble pas nuire du tout au succès de l'opération ; on peut le conclure déjà de ce fait que, d'après les rapports concordants de la pratique, même avec une pluie persistante, le foin pressé se prépare avec une composition normale, tandis qu'un taux d'eau insuffisant peut être très désastreux[2]. Il est important que les plantes soient placées dans les balles pressées aussi uniformément que possible et que les bords de ces balles soient bien lisses. Avant de mettre le tas

---

1. Le travail précédemment cité de F. ALBERT contient une description détaillée des différentes presses.

2. Voir F. ALBERT, *loc. cit.*, p. 59, et E. WOLFF, *Landwirthschaftliche Jahrbücher*, vol. XXI, 1892, p. 45.

de foin sous presse, on l'entoure d'une couche de paille dont l'épaisseur doit être d'environ 0m,50 après le pressage. Cette couche de paille servira à empêcher l'humidité du sol et le mélange de terre.

Quand la confection des tas est terminée, il s'y produit très vite un fort échauffement. Dès qu'il a atteint 60°-65°, il diminue rapidement jusque vers 50° par augmentation correspondante de la pression et se maintient assez longtemps entre 40° et 50°. Alors la température s'abaisse peu à peu et s'égalise finalement avec la température ambiante[1]. Pour se rendre compte de la marche de la température, ce qui est indispensable, on le comprend aisément, on se sert de thermomètres, dits d'ensilage, construits à cet effet[2].

Comme complément aux précédentes explications sur les diverses méthodes de conservation et sur les principes qui leur servent de bases, il reste à traiter une question importante pour la pratique : quels changements qualitatifs et quantitatifs ces différentes manipulations font-elles subir aux éléments primitifs du fourrage ? Tout d'abord, étant donné ce que nous savons sur la respiration et la fermentation, on doit admettre forcément qu'une partie de la matière organique éprouvera dans ces divers traitements non seulement une diminution par dégagement de produits gazeux, mais encore nécessairement une transformation chimique. Quelle perte la matière organique subit-elle par l'échauffement et les réactions de fermentation ? Cette question ne peut être résolue que par l'obtention de chiffres exacts, et les recherches précédentes, qui ont trait uniquement à la détermination de la composition centésimale des divers fourrages, laissent beaucoup à désirer sous ce rapport.

Celles qui se rapprochent le plus de ce que nous cherchons sont celles de H. Weiske[3]. Il a opéré avec du sainfoin dont un lot fut séché avec soin et dont l'autre fut préparé en foin brun et acide.

1. Voir F. Albert, *loc. cit.*, p. 17 et 24.

2. Quant à l'observation que par l'emploi de hautes températures on diminue dans une large mesure la digestibilité du fourrage, F. Albert admet qu'une température de 40°-50° convient mieux qu'une de 60°-66°, parce qu'on évite ainsi la formation d'acide acétique. On n'a pas encore démontré d'une manière certaine si on provoque ainsi une meilleure utilisation des principes nutritifs.

3. H. Weiske, *Journal für Landwirthschaft,* 1877, p. 170.

D'après les résultats analytiques et en tenant compte de l'importance de la récolte, la quantité de matière nutritive par coupe se calcule ainsi qu'il suit pour un hectare en kilogr. :

	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	ÉLÉMENTS non azotés.	MATIÈRES extraites par l'éther.	CELLULOSE brute.
	—	—	—	—	—
Foin bien séché.	5531.6	1092.4	2272.0	170.0	1997 0
Foin brun. . .	4458.6	991.8	1680.8	233.4	1552.2
Foin acide. . .	4139.4	914.0	1381.0	269.2	1573.2

Comme on le voit, la préparation du foin brun et du foin acide entraîne une perte importante de substance qui se répartit sur tous les éléments, sauf ceux extraits par l'éther. La perte centésimale est de :

	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	ÉLÉMENTS non azotés.	MATIÈRES extraites par l'éther.	CELLULOSE brute.
	—	—	—	—	—
Foin brun. .	19.4	9.2	26.0	+37.2	22.3
Foin acide. .	25.4	16.3	39.2	+58.4	21.2

Ce sont les éléments non azotés qui subissent la plus forte perte, puis vient la cellulose brute ; la protéine brute diminue le moins, mais encore notablement. L'augmentation des matières extraites par l'éther tient à la dissolution des acides gras volatils formés dans la fermentation. On voit nettement que la perte est plus grande pour le foin acide que pour le foin brun.

Dans certains cas, les pertes par fermentation peuvent être plus grandes, mais pas beaucoup plus petites que celles qui viennent d'être indiquées[1]. Holdefleiss, d'après ses observations sur l'ensilage du maïs vert, admet que la perte en matière organique est de 40 à 50 p. 100.

Dans les essais faits en Saxe à l'instigation de M. Mœrcker, sur des betteraves hachées, les pertes de poids par l'ensilage ont varié de 17.7 à 62.1 p. 100 (moyenne : 37.5 p. 100) et pour les divers éléments de :

14.6 à 56.5 (moyenne : 37.8 p. 100) pour les principes non azotés,
8.9 à 51.8 (— 29.6 p. 100) pour la cellulose brute,
4.5 à 39.7 (— 24.5 p. 100) pour la protéine brute.

1. E. Pott, *loc. cit.*, p. 100 à 105.

Un essai d'ensilage fait par le même auteur avec des pommes de terre préalablement coupées a donné une perte de 53.6 p. 100 en poids total, de 22.7 p. 100 en substance sèche, de 24.6 p. 100 en principes nutritifs non azotés, de 25.9 p. 100 en cellulose brute et de 57 p. 100 en éléments azotés. Mais on a fait aussi des expériences dans lesquelles les pertes étaient beaucoup moindres. Ainsi G. Liebscher a trouvé que des betteraves hachées n'avaient perdu que 5.2 à 7.3 p. 100 de leur poids et A. Stutzer, en préparant du foin acide avec du trèfle de Suède (*Trifolium hybridum*), n'a constaté qu'une perte de 5.7 p. 100.

Il y a aussi à considérer, pour juger de l'aptitude des fourrages à ces diverses préparations, outre les modifications de composition, celles de digestibilité qui ont un grand intérêt. Comment cette digestibilité est-elle modifiée dans la préparation du foin brun et du foin acide, c'est ce que les essais de H. Weiske indiquent nettement. Il fit consommer par des moutons des foins d'esparcette différemment préparés et obtint les coefficients de digestibilité ci-dessous :

	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	PRINCIPES non azotés.	MATIÈRES extraites par l'éther.	CELLULOSE brute.
Foin soigneusement séché.	61.82	71.24	76.32	66.46	39.28
Foin brun	59.15	63.51	67.04	75.64	45.29
Foin acide.	44.57	50.25	53.20	74.14	28.77

Ces nombres accusent une diminution notable de digestibilité pour le sainfoin préparé en foin brun ou en foin acide et surtout pour ce dernier. Seuls, les éléments solubles dans l'éther y ont été utilisés en plus forte proportion que dans le sainfoin simplement séché.

Si, d'après ces données, on calcule en principes réellement digérés les quantités obtenues par hectare et par coupe, on obtient les chiffres suivants qui représentent des kilogrammes :

	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	PRINCIPES non azotés.	MATIÈRES extraites par l'éther.	CELLULOSE brute.
Foin séché avec soin . .	3409.6	778.2	1731.0	113.0	784.4
Foin brun	2636.1	629.9	1126.8	176.5	702.9
Foin acide	1846.2	459.3	734.7	199.6	452.6

Les modifications subies dans les deux derniers modes de prépa-

ration des fourrages par les principes digestibles se calculent donc comme il suit en taux centésimal.

	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	PRINCIPES non azotés.	MATIÈRES extraites par l'éther.	CELLULOSE brute.
	—	—	—	—	—
Foin brun . .	—22.7	—19.1	—35.0	+56.2	—10.4
Foin acide . .	—45.9	—40.9	—57.6	+76.7	—42.3

Les pertes par échauffement et fermentation ressortent encore plus nettement dans ces chiffres que dans ceux qui sont calculés d'après la composition des fourrages et l'on voit que la quantité d'éléments utilisables est bien plus diminuée dans le foin acide que dans le foin brun.

Le foin vert pressé obtenu par une méthode semblable à celle des deux foins fermentés précédents doit nécessairement se comporter d'une manière analogue. C'est en effet ce qui arrive, comme le montrent les résultats de F. Albert[1]. Ils sont rassemblés dans le tableau de la page suivante où on n'a porté que les quantités de foin pressé réellement utilisables, tous les déchets ayant été comptés comme pertes avec celles dues à la fermentation.

Ainsi, par cette méthode comme par celle du foin acide, on subit une perte importante et la digestibilité des matières albuminoïdes est sensiblement diminuée. Ces pertes dans le foin vert pressé sont dues non seulement à l'échauffement spontané et à la fermentation, mais encore à la sève qui s'écoule au moment du pressage et à la couche gâtée, inutilisable, qui recouvre le bord des balles.

Pour simplifier le tableau, on n'y a fait figurer que les modifications quantitatives. Il en est aussi dans la qualité des produits ; la diminution de digestibilité des éléments du foin fermenté comparés à ceux du foin frais ou desséché avec soin le prouve déjà. Jusqu'alors on ne possède sur ces transformations que des observations éparses. Celles qui inspirent le plus de confiance ont trait aux principes azotés. Ceux-ci, par les divers processus de décomposition, se transforment en combinaisons plus simples, comme on pouvait le prévoir ; finalement une partie des éléments azotés se volatilise sous forme

1. F. ALBERT, *loc. cit.*, p. 84.

		POIDS TOTAL.		COMPOSITION DE LA SUBSTANCE SÈCHE.								
								Cette protéine brute renferme :			Partie digestible	
		Frais.	Sec.	Cendres.	Cellulose brute.	Éléments non azotés.	Protéine brute.	Albumine.	Matière non albuminoïde.	Combinaisons volatiles d'ammoniaque.	de protéine brute.	d'albumine.
		kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	kilogr.	p. 100.	p. 100.
Herbe de Gröbzig.	Matière fraîche	10 620	5 915,5	511,7	1 810,7	3 003,0	589,8	524,7	65,1	»	70.1	6.64
	Foin pressé utilisable	3 460	2 552	263,5	905,6	1 039,3	313,8	301,6	39,2	»	22.0	11.9
	Perte en p. 100	67.4	56.9	48.5	50.0	65.4	41.7	41.9	39.8	»	»	»
Trèfle rouge de Gröbzig.	Matière fraîche	18 515	5 206,5	513,8	1 260,1	2 358,3	1 044,3	884,7	159,6	»	86.1	83.6
	Foin pressé utilisable	6 700	2 124	272,7	976,0	622,4	668,9	430,1	136,3	102,5[1]	34.9	22.6
	Perte en p. 100	80.2	71.4	49.8	22.5	25.9	35.9	51.4	14.6	»	»	»
Anthyllide de Munich.	Matière fraîche	33 855	7 428	660,4	2 496,6	3 141,3	1 129,8	875,8	254,0	»	82.6	77.5
	Foin pressé utilisable	6 700	2 124	163,8	874,2	758,5	327,5	189,7	90,7	»[2]	41.4	23.6
	Perte en p. 100	80.2	71.4	75.2	65.0	75.5	31.0	78.3	64.3	»	»	»
Maïs de Munich	Matière fraîche	114 835	22 094	1 411,8	6 891,3	12 633,6	1 157,8	755,6	402,1	»	73.9	59.9
	Foin pressé utilisable	45 875	10 799	582,1	3 904,9	5 503,2	808,9	517,3	263,5	28,08[3]	52.4	31.1
	Perte en p. 100	60.0	51.1	58.8	43.3	56.4	30.1	31.5	34.5	»	»	»
Betteraves de Munich.	Matière fraîche	154 325	41 390	18 774,5	5 471,8	13 724,9	3 418,8	2 446,1	972,7	»	72.0	6 .9
	Foin pressé utilisable	63 335	24 757	13 760,2	2 507,9	6 951,9	1 537,4	925,9	311,1	297,1[4]	57.5	61.5
	Perte en p. 100	58.9	40.2	26.7	44.1	49.3	55.0	62.1	67.7	»	»	»

1. 15.3 p. 100 de la protéine brute. 2. 47.1 p. 100 de la protéine brute. 3. 3.4 p. 100 de la protéine brute. 4. 19.3 p. 100 de la protéine brute.

d'ammoniaque et probablement aussi parfois sous forme d'azote libre. Ce sont principalement les matières azotées non albuminoïdes (amides) qui sont l'objet de ces transformations. Quant aux matières albuminoïdes, diverses observations ont montré qu'une plus ou moins grande partie se transforme en principes non albuminoïdes dans la fermentation ; cela se déduit particulièrement de ce fait que les différents fourrages fermentés sont relativement plus riches en ces derniers principes et plus pauvres en matières albuminoïdes. Par exemple, A. Stutzer[1] a trouvé, pour le trèfle rouge, que sur 100 parties en poids de protéine brute, il y avait :

	DANS le foin sec.	DANS le foin pressé.
Amides.	17.7	43.3
Principes albuminoïdes facilement digestibles.	51.8	35.9

Les modifications des matières extractives non azotées et de la cellulose brute n'ont pas été jusqu'alors étudiées. Une portion de ces deux groupes est naturellement employée pour les réactions d'oxydation et les matières extractives servent en partie à former des acides volatils et non volatils.

En résumé, de ce que nous venons de dire il ressort nettement que, dans toutes les préparations de fourrages où l'on provoque l'échauffement spontané et la fermentation, il y a des pertes notables sur tous les éléments, sauf ceux qui sont solubles dans l'éther; qu'en même temps la digestibilité des éléments nutritifs subit une importante diminution et que la composition primitive se modifie de telle façon que le pouvoir nutritif du fourrage s'amoindrit. D'ailleurs, dans le procédé ordinaire (séchage du foin), même avec des temps favorables, on ne peut éviter une perte de matière, par exemple par la chute d'une partie des feuilles, surtout chez les trèfles ; mais cette perte, quand le foin est convenablement manipulé, est sensiblement moindre que celle qu'éprouve le foin fermenté. Si l'on tient compte de l'incertitude de la réussite de tous les procédés reposant sur l'échauffement spontané et la fermentation, on ne pourra s'empêcher de reconnaître que *le séchage à l'air, quand le temps est suffisam-*

1. E. Pott, *loc. cit.*, p. 112.

ment favorable, doit être toujours préféré à toutes les autres méthodes de conservation ; on ne doit avoir recours à la confection de foin brun, de foin acide, de foin vert pressé, que dans les cas de besoin pressant, quand les conditions climatériques sont extrêmement défavorables.

Ces procédés ne sont de mise que par des temps extraordinairement mauvais ; mais on peut se mettre à l'abri de l'influence de l'humidité nuisible à la préparation du foin sec. De nombreuses expériences faites montrent que l'emploi de claies écarte sûrement la dissolution des principes nutritifs ou la pourriture du fourrage quand son séchage se fait difficilement. Le foin ainsi préparé a non seulement la composition du foin brun, mais une valeur d'utilisation bien plus grande, à cause de la plus grande digestibilité de ses éléments ; ceci a été prouvé par une expérience de G. Kuhn[1].

Le taux centésimal des deux sortes de foin était :

	PROTÉINE brute.	MATIÈRES extractives non azotées.	MATIÈRES grasses brutes.	CELLULOSE brute.	CENDRES.
Trèfle séché à la claie.	18.94	40.09	2.79	31.43	6.75
Trèfle brun	18.69	39.49	2.03	33.01	6.75

La digestibilité des divers éléments était :

	SUBSTANCE sèche.	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	MATIÈRES extractives non azotées.	MATIÈRES grasses brutes.	CELLULOSE brute.
Trèfle séché à la claie .	52.7	55.1	60.4	62.7	51.0	42.5
Trèfle brun	45.0	47.4	32.0	55.7	43.3	46.4

Ce qui correspond pour :

	SUBSTANCE sèche.	MATIÈRE organique.	PROTÉINE brute.	MATIÈRES extractives non azotées.	MATIÈRES grasses brutes.	CELLULOSE brute.
le trèfle séché à la claie à	52.7	51.4	11.44	25.14	1.42	13.36
le trèfle brun.	45.0	44.2	5.98	22.00	0.88	15.33

en calculant la quantité d'éléments digestibles dans 100 parties.

1. G. Kuhn, *Landwirthschaftliche Versuchsstationen*, vol. XLIV, 1894, p. 2.

Donc, à l'exception de la cellulose brute, la digestibilité des éléments s'est montrée sensiblement meilleure dans le foin séché sur claie ; le taux de protéine notamment y est le double de celui du foin brun. Ces chiffres permettent d'affirmer que l'emploi de claies pour le séchage du foin vert est des plus avantageux, parce qu'on est sûr de réussir le séchage même dans des conditions peu favorables. Les frais d'établissement de ces claies[1] sont couverts par le fourrage que l'on gagne et qui serait perdu par les autres procédés. Ceux-ci ne méritent d'être employés que là où le séchage sur claies est impossible, donc dans un climat ou par un temps extraordinairement humide. Dans ce cas, à quel procédé donner la préférence ? Cela est difficile à dire vu les variations que les circonstances extérieures infligent aux pertes en matières nutritives. Autant qu'on peut le conclure des recherches précédentes, le foin brun présente, sous le rapport de la conservation et de la digestibilité des produits, divers avantages sur le foin acide et le foin pressé ; mais il a cet inconvénient qu'il doit être séché avant d'être mis en tas.

Enfin, mentionnons que certains fourrages aqueux tels que les lupins, les feuilles de betteraves, le maïs vert, les betteraves et pommes de terre gelées, les hachis de betteraves, les drèches, etc., ne se laissent pas dessécher à la manière ordinaire et doivent être travaillés comme le foin brun ou le foin pressé quand on ne réussit pas à les dessécher artificiellement, procédé qui a déjà été employé avec succès pour les drèches et les betteraves hachées.

---

1. Le coût d'une pyramide formée par 3 perches de 3 mètres de longueur avec les perches transversales, est de 4 à 5 fr. Comme il faut de 30 à 40 claies par hectare, cela fait une dépense de 120 à 150 fr. A quoi il faut ajouter 15 p. 100 pour amortissement et réparation, soit 15 à 20 fr. par hectare.

APPENDICE

INDIQUANT LES PRINCIPAUX TRAVAUX PUBLIÉS DE 1895 A 1900

NOTE A

Sur l'alinite (Voir p. 133).

Le *Bacillus megatherium* dont le Dr Wollny ne parle qu'une fois devait bientôt devenir célèbre. On se rappelle quel retentissement eut la publication faite en 1897 par un cultivateur allemand, M. Caron, d'Ellenbach, de la découverte d'une bactérie du sol capable de fixer l'azote de l'air au profit des céréales. Après de nombreuses recherches, M. Caron parvint à isoler un microbe spécial qui reçut le nom de « microbe d'Ellenbach » et qu'il cultiva par les méthodes usitées en bactériologie. Les graines inoculées avec ce bacille lui donnèrent, d'abord dans des essais en pots, des accroissements de rendement de 10 à 35 p. 100 qui se maintinrent dans les cultures de céréales en grand. Le Dr Stoklasa, directeur du laboratoire de bactériologie de Prague, reconnut que le bacille isolé par M. Caron et nommé par lui *Bacillus Ellenbachensis* α n'était autre que le *Bacillus megatherium* (de Bary) très répandu dans les sols et dans les eaux. Dans une récente communication faite devant la Société allemande d'agriculture (V. *Deutsche landw. Presse,* 1900, p. 189-191), M. Stoklasa résume son opinion sur ce sujet qu'il a étudié activement dès le début. Il montre[2], par quelques exemples tirés de ses recherches, que l'addition aux terres cultivées d'espèces microbiennes très répandues dans les sols (*Bacillus mycoides, B. fluorescens liquefaciens, B. proteus vulgaris, B. subtilis,*

---

1. Pour la rédaction de cet appendice, nous avons surtout utilisé : les *Annales agronomiques,* publiées par P. P. Dehérain ; les *Annales de la Science agronomique française et étrangère,* publiées par L. Grandeau ; les *Forschungen auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik,* rédigées par E. Wollny, et les *Experiment Station Record,* publiées par le département de l'agriculture des États-Unis. Le peu de place dont nous disposons ne nous permettra de citer que les travaux les plus importants. (E. Henry.)

2. Voir *Annales agronomiques,* 1900, p. 353-354.

B. butyricus Hueppe, *B. megatherium*, *B. ureæ*, *B. mesentericus*, *B. coli communе*) en augmente les récoltes d'une manière très sensible.

Mais surtout il dit avoir isolé un nouveau microbe compagnon de travail du *Bacillus megatherium*, l'agent de l'alinite, et sans lequel l'alinite ne pourrait fixer dans le sol l'azote atmosphérique. L'action de l'alinite dans les cas les plus favorables est en effet double ; il y a d'une part solubilisation des réserves azotées du sol (ce serait le fait de *B. megatherium*) et, d'autre part, fixation d'azote libre (par le nouveau bacille). Il est donc nécessaire que les deux espèces soient réunies pour que l'alinite agisse manifestement.

Le nouveau microbe a été isolé d'une terre humifère et son origine explique, selon Stoklasa, les résultats contradictoires des essais d'alinite sur lesquels on a déjà tant discuté en France et en Allemagne. Le premier mode opératoire, indiqué par l'inventeur de l'alinite, et consistant à arroser les semences de cultures pures de *Bacillus megatherium* n'apportait donc qu'un des agents de l'alinite ; il fallait que l'autre se trouvât dans le sol et pour cela il fallait que le sol fût riche en matières organiques.

Enfin, les recherches du professeur Stoklasa l'ont amené à constater que de nombreuses espèces microbiennes sont capables de minéraliser l'azote organique du sol en le transformant en sels ammoniacaux. Mais, de toutes les espèces étudiées, c'est *B. megatherium* qui agit avec le plus d'intensité, surtout quand on lui donne des pentoses ($C^5 H^{10} O^5$), le xylose, par exemple, pour se nourrir.

Quoi qu'il en soit, on n'en est jusqu'ici qu'à la période des essais ; les résultats contradictoires obtenus jusqu'alors montrent qu'on n'est pas maître du tout des conditions de réussite. Tandis que MM. Grandeau, Stoklasa, Hallu, Rzetkowski, etc., ont constaté une augmentation sensible de récolte dans les parcelles alinitées, d'autres, Franck, Stutzer et Wagner, Lehmann, etc., n'ont rien obtenu.

Les plus récentes expériences sur l'emploi de l'alinite sont, croyons-nous, celles de M. Malpeaux[1], dont voici les conclusions :

1° En sable siliceux stérile, l'alinite seule ne donne pas d'accroissement de récolte ; employée simultanément avec des matières hydrocarbonées, ses effets ont été plus marqués, sans pour cela être absolument favorables ;

2° En terreau de jardin, l'imprégnation des semences avec l'alinite a donné des résultats avantageux ;

3° Dans les terres arables ordinaires renfermant une proportion moyenne d'humus, l'emploi de l'anilite n'a été suivi d'aucun succès ;

---

1. Voir *Annales agronomiques*, 1900, p. 196-211.

4° Dans les sols riches en matières organiques, l'alinite donne des résultats favorables, bien inférieurs cependant à ceux fournis par le nitrate de soude;

5° Pour que la culture puisse tirer profit de la vaccination des semences au moyen de l'alinite, il faut que les ferments trouvent dans le sol les conditions favorables à leur alimentation. Mais la fixation de l'azote aérien par action microbienne peut avoir lieu sans aucun ensemencement de ferments, dans un milieu convenable. Les expériences exécutés sur ce sujet, par M. Dehérain, sont absolument décisives; elles ont, du reste, été confirmées par les recherches récentes de M. Mazé, physiologiste à l'institut Pasteur.

NOTE B

Sur les organismes de la nitrification (Voir p. 141).

MM. Winogradsky et Omélianský ont publié en 1899, dans les *Archives des sciences biologiques russes,* d'importantes recherches sur les organismes de la nitrification. On en trouvera un excellent résumé dans les *Annales agronomiques* (t. XXVI, 1900, p. 295-316); nous ne pouvons ici qu'en indiquer brièvement les points principaux.

Après une étude des meilleurs procédés d'isolement du ferment nitreux et du ferment nitrique, les auteurs étudient l'influence des substances organiques sur le travail des microbes nitrificateurs. Pour le microbe nitrique, l'influence du carbonate alcalin, des sels de fer, du glucose, de la glycérine, de la peptone, de l'asparagine, de l'urée et de divers liquides organiques complexes a été successivement examinée. L'urine d'homme s'étant montrée particulièrement nuisible au ferment nitrique, les auteurs ont été amenés à constater que l'ammoniaque est extrêmement funeste au fonctionnement du ferment nitrique, et que celui-ci n'agit pas sur l'ammoniaque, fait déjà émis par M. Warington, qui avait observé qu'en présence des ferments nitreux et nitrique, le nitrite s'oxyde seulement quand toute l'ammoniaque a disparu.

Pour le microbe nitreux on a étudié l'influence de la peptone, du glucose, de la glycérine, de l'asparagine, de l'acétate de soude, de l'urée, du bouillon et de l'infusion de crottin. Il résulte de ces essais que le travail des deux ferments de la nitrification est entravé et même complètement arrêté par la présence de faibles doses de matières organiques. Aliments pour la plupart des micro-organismes, elles se comportent comme de véritables antiseptiques vis-à-vis des ferments nitrificateurs. Il est éga-

lement remarquable que l'ammoniaque dont peuvent se nourrir beaucoup de microbes joue, vis-à-vis du seul ferment nitrique, le rôle d'un antiseptique d'une rare puissance, supérieure à celle du sublimé ; cinq millioniêmes entravent l'oxydation des nitrites, et 15/100,000e l'empêchent totalement.

D'après M. Godlewski, c'est le gaz carbonique qui est la source de carbone de la nitrosomonade et le ferment nitreux a pour seule fonction, comme l'a déjà indiqué M. Winogradsky, de transformer l'ammoniaque en acide nitreux.

Enfin, dans un dernier travail, M. Oméliansski cherche à répondre aux questions suivantes : Les microbes de la nitrification (ferment nitreux et ferment nitrique) sont-ils capables d'agir directement sur les matières azotées du sol, et d'amener l'azote à la forme définitive d'azote nitreux, puis d'azote nitrique, avec ou sans formation intermédiaire d'ammoniaque ? Ou bien, ont-ils un rôle spécifique unique, le ferment nitreux ne pouvant qu'agir sur l'ammoniaque, et le ferment nitrique ne pouvant qu'oxyder l'acide azoteux, suivant l'opinion émise par M. Winogradsky ?

La réponse est nette. *L'azote organique, quelle que soit sa forme, ne subit pas l'action oxydante des microbes nitrificateurs.* D'autres organismes doivent donc attaquer les matières carbo-azotées avant que les nitrificateurs puissent entrer en jeu. Ainsi, l'association du *Bacillus racemosus* aux deux ferments de la nitrification suffit à transformer l'azote organique.

NOTE C

Sur la destruction des microbes pathogènes par l'ozone

(Voir p. 174).

L'ozone entrave tellement l'activité des micro-organismes, suivant l'expression du Dr Wollny, que l'on a songé à l'utiliser pour la stérilisation industrielle des eaux potables.

Les résultats des expériences faites à ce sujet par MM. Marnier et Abraham les ont conduits notamment à cette conclusion que tous les microbes pathogènes ou saprophytes, rencontrés dans les eaux étudiées par eux, ont été parfaitement détruits par le passage de ces eaux dans la colonne ozonatrice. Seuls quelques germes de *Bacillus subtilis* ont résisté.

NOTE D

Sur l'absorption des matières hydrocarbonées et azotées par les plantes (Voir p. 255).

M. J. Laurent[1] a recherché si les plantes pouvaient absorber du glucose et du sucre interverti. Des graines de maïs, stérilisées au bichlorure de mercure, ont été mises à germer sur une solution minérale nutritive additionnée ou non de glucose ou de sucre interverti. Le maïs se développait mieux et donnait un feuillage d'un vert beaucoup plus sombre dans les solutions renfermant de la matière organique. A la fin de l'expérience, on a fait l'examen du liquide nutritif et on a déterminé le poids des végétaux. On a trouvé que la quantité de sucre absorbée est en rapport avec le poids sec de la plantule et on a remarqué « que les matières sucrées absorbées sont utilisées et qu'une grande partie doit être rejetée sous forme de gaz carbonique, puisque leur poids peut atteindre ou même dépasser sensiblement le poids sec de la plante ».

Cette question a déjà été étudiée au laboratoire de physiologie végétale du Muséum, et on y est arrivé aux mêmes conclusions que M. Laurent (voir *Ann. agron.*, t. XX, 1894, p. 353[2]).

Plus récemment, M. Lutz a recherché si les composés organiques formant la classe des amines et des ammoniums composés et celle des alcaloïdes sont susceptibles d'être assimilés par les plantes, et si leur assimilation peut se faire directement sans fermentation préalable, comme M. Müntz l'a constaté pour les sels ammoniacaux. Les expériences établissent que, placés dans des conditions d'asepsie aussi rigoureuse que possible et de telle sorte que les agents extérieurs ne puissent exercer aucune action, soit fermentescible, soit fixatrice d'azote libre, les végétaux phanérogames peuvent emprunter l'azote qui leur est nécessaire à des composés organiques appartenant à la classe des amines, employés sous forme de sels. L'assimilation de ces substances peut avoir lieu sans que leur azote ait subi au préalable une transformation en azote nitrique ou ammoniacal.

Les méthylamines sont d'excellentes sources d'azote assimilable, mais la benzylamine et la pyridine sont insuffisantes, et les amines phénoliques

---

1. *C. R.*, t. CXXV, 1897, p. 887-889.

2. *Annales des Sciences naturelles*, 8e série. Botanique, t. VII, brochure in-8 de 105 pages. (Analysé dans le *Bulletin de la Société botanique de France*, 1899, p. 349-352.

(diphénylamine, etc.) ont agi comme des toxiques puissants. Il y a donc des différences considérables entre les diverses amines à ce point de vue.

Appliquant ces résultats à l'étude des engrais et en particulier des fumiers, l'auteur montre que leur action fertilisante est plus simple qu'on ne le croyait jusque-là. On sait qu'il se forme des quantités importantes d'amines au début de la fermentation des fumiers et de diverses matières utilisées comme engrais. On supposait que l'azote organique résultant de leur putréfaction devait être transformé en sels ammoniacaux, puis en nitrates, par les ferments du sol, pour que les plantes puissent l'assimiler. Ces transformations successives sont inutiles, puisque les plantes assimilent les amines inférieures aussi bien que les nitrates. Cela explique la rapidité d'action des fumiers sur la végétation.

NOTE E

Sur les substances azotées qui accompagnent l'acide humique dans les tourbes et dans le sol (Voir p. 304).

M. Sestini a cherché récemment à déterminer à quel état se trouve l'azote que l'on rencontre toujours en certaines proportions dans les substances humiques extraites de la tourbe ou du sol[1].

L'auteur a employé de l'acide humique retiré de certaines tourbes italiennes; après y avoir dosé l'azote total et l'azote préexistant à l'état d'humate d'ammoniaque, il a fait bouillir pendant plusieurs heures le même acide humique avec une solution étendue de soude (2 p. 100) et ensuite avec une solution d'acide chlorhydrique (10 p. 100), en dosant séparément l'azote ammoniacal qu'on peut extraire par ces traitements.

Il n'a extrait ainsi qu'un peu plus de la moitié de l'azote total; cette portion peut être regardée comme étant à l'état d'amide.

Pour vérifier si l'azote restant se trouve à l'état d'acides amidés, on peut profiter de la propriété qu'a l'acide nitreux de décomposer ces acides, en dégageant à la température ordinaire un notable volume d'azote libre; en effet, en faisant agir une solution d'acide nitreux sur l'acide humique, traité d'avance avec l'acide chlorhydrique, l'auteur a pu recueillir un gaz qui n'est absorbé, ni par la potasse, ni par le phosphore, ni par le sulfate ferreux.

L'auteur observe, en outre, que, pendant l'action de l'acide chlorhydrique sur l'acide humique naturel brut ou purifié, et même sur l'acide

---

1. Analysé dans les *Annales agronomiques*, 1900, p. 316.

humique artificiel retiré du saccharose, on peut vérifier la formation constante de furfurol qu'il est facile de doser à l'état de phloroglucide. Les taux trouvés ont varié de 0,7 à 1 p. 100 pour les acides humiques naturels. Ces observations confirment les résultats obtenus par Feilitzen et Tollens sur les tourbes allemandes ; mais, d'après des recherches successives de M. Sestini, cela n'autorise pas à considérer le furfurol retiré des tourbes comme provenant seulement des pentosanes, étant donné que d'autres hydrates de carbone donnent du furfurol par l'action de la chaleur et des acides.

M. B. Renault[1] a aussi publié dernièrement d'importantes recherches sur la constitution des tourbes.

NOTE F

Sur l'humus et la fertilité du sol (Voir p. 405).

On trouvera dans le *Yearbook of the United States* de 1895 un travail d'ensemble de M. H. Snyder sur ce sujet, travail qui est analysé dans les *Annales agronomiques*[2] et qui montre bien que, dans tous les pays, sous tous les climats et pour les mêmes raisons, l'humus est de la plus haute importance pour la fertilité du sol. L'auteur étudie successivement l'influence de la perte d'humus sur la fertilité, l'azote dans l'humus, les matières minérales, la valeur des humates comme nourriture des plantes, les moyens d'employer la quantité d'humus contenue dans le sol, l'influence de l'humus sur l'eau et la chaleur du sol et les moyens de maintenir cet humus.

Nous ne donnons pas de résumé de ce travail, parce qu'il n'est que la confirmation de ce que l'on sait sur ce sujet. M. Gauthier[3], se plaçant au point de vue spécial de la fixation de l'azote libre, montre l'importance de l'humus pour la fertilité, en démontrant que les algues et les micro-organismes du sol ne fixent l'azote libre qu'en présence des composés de l'humus. L'azote ainsi fixé est directement assimilable par les plantes supérieures. Si le sol manque d'humus, les organismes variés qui fixent l'azote ne se développent pas en quantité suffisante pour enrichir le sol en cet élément si rare et si précieux.

---

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 1898, 2e sem., p. 826.
2. Voir t. XXII, 1896, p. 551-564.
3. Voir *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* 1897, p. 1205-1206.

NOTE G

Sur la dénitrification par le fumier (Voir p. 406).

En 1895, MM. Wagner et Mœrcker publièrent des expériences et des conclusions qui émurent profondément le monde agricole, parce qu'elles étaient de nature à jeter le discrédit sur l'emploi du fumier qu'ils accusaient de détruire rapidement les nitrates du sol. Heureusement, il a été reconnu que les idées exprimées par les expérimentateurs allemands étaient fort exagérées. M. Dehérain en France, M. Warington en Angleterre, M. Rogoyski à Cracovie, ont rétabli la vérité et montré que la croyance séculaire en la valeur fertilisante du fumier était bien fondée. Nous ne pouvons encore ici que résumer très brièvement les conclusions de ces trois savants aux mémoires desquels nous renvoyons le lecteur.

A la fin du travail de M. Dehérain[1] nous lisons :

. . . .

9° Quand on ajoute à la terre renfermant des nitrates de très fortes proportions de paille ou de fumier, elle perd des quantités de nitrates considérables ;

10° Mais, quand on mélange à des terres chargées de nitrates les quantités de fumier habituellement employées dans la pratique agricole, cette réduction fait place à un accroissement de nitrates ;

11° La puissance réductrice des bactéries contenues dans le fumier de ferme ou dans les excréments des animaux est donc trop faible pour qu'il soit nécessaire d'engager la culture à traiter le fumier par l'acide sulfurique avant de l'épandre.

M. Warington dit aussi à la fin de son mémoire[2], qu' « en résumé, les résultats fournis par les expériences culturales de Rothamsted, et portant sur le fumier de ferme et sur la paille, sont loin de confirmer les conclusions des expérimentateurs allemands; leurs résultats sont dus aux conditions spéciales dans lesquelles ils se sont placés, et principalement à l'emploi de très fortes doses de fumier ou de paille ».

Enfin, M. Rogoyski[3] donne à son récent travail sur cette question les conclusions suivantes :

1° S'il y a une dénitrification des nitrates dans la terre en présence d'une grande quantité de crottin, l'azote des nitrates décomposés, selon

---

1. Voir *Annales agronomiques,* t. XXIII. 1897, p. 49-79.
2. Voir *Annales agronomiques,* t. XXIV, 1898.
3. Voir *Annales agronomiques,* t. XXVI, 1900, p. 121-140.

les conditions qui accompagnent la dénitrification, se dégage à l'état libre, ou bien il est partiellement ou totalement transformé en azote insoluble ;

2° Si l'on fume une terre avec de l'urine (ou avec des sels ammoniacaux) et en même temps avec de grandes quantités de crottin ou de paille, l'azote de l'urine, selon les conditions, peut être dégagé à l'état libre ou se transformer en azote insoluble. Cet azote insoluble paraît être en état de se nitrifier facilement ;

3° Les phénomènes signalés dans les conclusions n°s 1 et 2 ne peuvent s'accomplir que si l'on fume avec des quantités de crottin qui ne sont jamais en usage dans la grande pratique. Au contraire, si l'on fume avec des quantités médiocres, mais encore toujours plus grandes que dans les conditions de la grande pratique, ces phénomènes ne se produisent pas ; les nitrates persistent, sans changer, dans la terre, et l'azote de l'urine est nitrifié ;

4° Les conclusions que les savants allemands ont tirées, pour la pratique, de leurs recherches sur la dénitrification, ne sont pas fondées.

NOTE H

Sur l'influence de diverses couvertures sur les propriétés physiques du sol (Voir p. 445).

Le Dr E. Ramann, professeur à l'institut forestier d'Eberswalde, a publié récemment ses recherches sur cette question[1]. Il part de cette idée qu'un sol est d'autant plus favorable à la végétation qu'il est plus poreux et qu'il présente à un plus haut degré la structure grumeleuse. Pour déterminer le degré de porosité, il mesure le volume des vides (ou *pores*) qui séparent les particules de terre, et, en se fondant sur ses nombreuses déterminations, il sépare les sols sablonneux en :

Sols très compacts, dont le volume des pores est inférieur à 50 p. 100 ;

Sols compacts, dont le volume des pores varie de 50 à 55 p. 100 ;

Sols meubles, dont le volume des pores varie de 55 à 60 p. 100 ;

Sols très meubles, dont le volume des pores dépasse 60 p. 100.

Il y a un rapport évident entre la fertilité d'un sol et sa compacité. On ne constata une compacité très forte que sur des sols de la moindre fertilité, et les sols de la plus haute productivité étaient toujours des sols meubles ou très meubles.

---

1. Voir *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen*, août 1898.

Nous nous contenterons de résumer ici brièvement les résultats des observations et des expériences du Dr Ramann :

1° La détermination du volume des pores donne un moyen simple de suivre les modifications qui interviennent dans la compacité des sols forestiers ;

2° L'espèce d'humus qui se forme a une action très nette sur la compacité et sur les principales propriétés physiques du sol, comme aussi sur ses qualités chimiques ;

3° L'humus brut (*Rohhumus*) est, dans tous les cas, nuisible, même sous une faible épaisseur ;

4° Les diverses couvertures (hêtre, épicéa, fougère, airelle, mousse, etc.) influent différemment, suivant qu'elles provoquent ou qu'elles écartent la formation de l'humus brut ; leur action sera d'autant plus favorable qu'elle contribuera plus à produire et à maintenir sur le sol de la forêt le terreau neutre, dit encore l'humus forestier ;

5° Le hêtre (et probablement le charme), parmi toutes les couvertures mises en expérience, fournit la meilleure à ce point de vue ;

6° L'épicéa, par sa couche compacte d'aiguilles qui se décompose facilement en humus brut, a une influence moins heureuse ; sous les épicéas, la couverture se laisse difficilement pénétrer par l'air et par l'eau. Les détritus abondants retiennent beaucoup d'eau, si bien que les petites pluies sont absorbées par la couverture. Les racines, longuement traçantes de l'épicéa, absorbent une très grande partie des précipitations, à ce point que les arbres à enracinement pivotant, mélangés à des épicéas, souffrent du manque d'eau ;

7° La fougère impériale agit dans le même sens que les arbres feuillus, tant qu'il ne s'est pas formé d'humus brut ;

8° Les herbes ont une influence favorable en détruisant les couches d'humus brut ; mais par tous les autres côtés (desséchement du sol, perte des jeunes plants forestiers, diminution de la vie animale dans le sol) ce sont les pires ennemis du sylviculteur ;

9° La couverture de mousse (*hypnum*), avec sa couche d'humus sous-jacente, absorbe les faibles pluies et les évapore sans rien céder au sol ; elle sature d'acide humique l'eau des fortes pluies qui pénètrent dans le sol et qui dissolvent alors les principes minéraux solubles, en détruisant l'état grumeleux et en augmentant ainsi la compacité du sol ;

10° Les airelles détériorent le sol par leur enracinement et par la formation d'humus brut (terre de bruyère) ;

11° L'auteur déduit de ses recherches et observations les règles suivantes importantes en culture forestière :

Un sous-étage de hêtre et de charme sous des essences à couvert léger est le meilleur moyen d'entretenir et d'améliorer la fertilité du sol. Sous

le couvert du hêtre, le sol de la pineraie est maintenu en bon état ; il ne se forme pas d'humus brut (terre de bruyère), et les plantes nuisibles ne se développent pas ou meurent. La constitution du sous-étage en épicéa doit être limitée aux sols humides et aux régions à climat humide ; ailleurs, c'est une mauvaise opération.

Le genre de décomposition des détritus organiques et son influence sur la structure du sol expliquent les avantages des peuplements mélangés.

NOTE I

Sur la jachère (Voir p. 477).

Dans les *Annales agronomiques*[1], M. Dehérain est revenu à plusieurs reprises sur la jachère. Il montre dans une première étude que la pratique de la jachère avait pour action principale la formation des nitrates aux dépens des réserves azotées du sol, formation qui profitait au blé semé à l'automne de la jachère. Elle permettait aussi la destruction des mauvaises herbes, dont il était impossible de se débarrasser autrement, avant que la culture des plantes sarclées et l'usage des semailles en lignes se fussent généralisés. Mais aujourd'hui que notre production de fumier s'est accrue, que nous pouvons acquérir du nitrate de soude, la pratique de la jachère, si utile à une culture qui souffre de la pénurie d'engrais, n'a plus de raison d'être. Elle disparaîtra d'autant plus sûrement que, plaçant en tête de l'assolement des betteraves et des pommes de terre faciles à sarcler, nous nous débarrassons aisément des adventices, des mauvaises herbes dont on n'avait raison autrefois que pendant l'année de jachère.

Dans un second mémoire, M. Dehérain insiste sur ce point que l'humidité se conserve bien mieux dans une terre nue, maintenue propre, que dans un sol emblavé dont les végétaux exercent une puissante action desséchante ; or, comme pendant la belle saison c'est le défaut d'humidité qui empêche la nitrification de s'établir énergiquement, on comprend l'utilité de la jachère pour la production des nitrates quand, par de nombreuses façons, on détruit toutes les plantes adventices.

---

1. 1896, p. 257-263 et p. 515-523.

NOTE J

Sur le travail mécanique du sol (Voir p. 473).

M. Dehérain a consacré, dans ces dernières années, à l'étude de cette question capitale trois mémoires que nous n'analyserons pas ici, puisqu'ils ne touchent qu'indirectement à la *décomposition des matières organiques*, mais que le lecteur aura le plus grand intérêt à consulter. On verra qu'ils confirment pleinement les vues émises par le Dr Wollny.

Le premier mémoire[1] a trait à l'aération du sol; il explique, entre autres, les effets du roulage et du hersage, et l'utilité considérable qu'il y a, lors des labours, à ne pas déterminer la formation de mottes, c'est-à-dire à maintenir la texture grumeleuse du sol, la *Krümelstructur* des Allemands, sur laquelle le Dr Wollny insiste avec tant de raison.

Dans le second mémoire[2], l'auteur démontre que l'ameublissement favorise la pénétration de l'eau dans la terre, son écoulement dans les profondeurs, où elle est soustraite à l'évaporation. Si, dit-il, les cultivateurs ouvrent leur sol par des labours de déchaumage aussitôt après la récolte et l'ameublissent ensuite profondément par les grands labours d'automne, c'est afin d'assurer l'approvisionnement d'eau du sol et de constituer les réserves d'humidité du sous-sol.

Enfin, dans un troisième article[3], M. Dehérain étudie la pénétration, l'emmagasinement et le mouvement de l'eau dans le sol et insiste encore sur le but général de toutes les opérations mécaniques du sol, qui est d'y introduire et d'y emmagasiner, pour les besoins de la végétation, des quantités d'eau suffisantes. « Suivant que la pulvérisation par les instruments sera bien ou mal obtenue, l'approvisionnement d'eau sera copieux ou misérable et la récolte bonne ou mauvaise. Un bon praticien connaît bien sa terre ; il sait à quel état elle doit être pour qu'il puisse la travailler utilement ; il sait à quel moment il faut *la prendre* pour obtenir l'ameublissement cherché ; s'il opère maladroitement, il rend sa terre motteuse ; elle est mal préparée, elle est *gâtée ;* les récoltes y sèchent aussitôt que la pluie fait défaut. » C'est aussi ce que dit M. Wollny et à peu près dans les mêmes termes.

1. Voir *Annales agronomiques*, t. XXII, 1896, p. 449-469.
2. Voir *Annales agronomiques*, t. XXIII, 1897, p. 216-229.
3. Voir *Annales agronomiques*, t. XXIV, 1898, p. 449-481.

NOTE K

Sur l'épandage et l'enfouissement du fumier de ferme

(Voir p. 485).

Le Dr Wollny dit que les recherches de Hellriegel ont montré que les quantités d'ammoniaque qui se dégageaient du fumier en couverture étaient négligeables. Mais des expériences de M. Dehérain[1] ont établi que du fumier qui était resté exposé à l'action de l'air pendant 14 jours avait perdu près du quart de son azote primitif, soit sous forme d'ammoniaque, soit sous forme d'azote libre. Dans des essais en tube où l'on a fait passer de l'air sur du fumier pendant 26 jours, le courant d'air a fini par lui enlever toute l'ammoniaque qu'il renfermait ; c'est donc une très grosse faute que de laisser le fumier exposé à l'air ; il faut le soustraire le plus rapidement possible à cette cause de déperdition, en l'enfouissant dans le sol. La terre humide retient très bien l'ammoniaque ; les entraînements qui se produisent quand le fumier est exposé à l'air cessent quand le fumier est enterré.

Dans ce même travail, M. Dehérain confirme par des expériences nouvelles ce fait, déjà établi par lui et par le Dr Wollny, que la décomposition de la matière azotée du fumier avec dégagement d'azote libre est due à l'action des bactéries, tout comme celle de la cellulose en méthane et acide carbonique.

Étant donné que le fumier exposé à l'air perd d'abord tout ou partie de l'ammoniaque qu'il renferme et de plus une fraction importante de son azote organique, l'auteur en déduit que, lorsque le fumier est éparpillé sans soins dans la cour de ferme, qu'il n'est pas tassé et que la fermentation productrice d'acide carbonique ne s'y établit pas, il perd une fraction plus ou moins forte du plus important, du plus coûteux de ses éléments.

De même, dit M. Dehérain, *fumer en couverture*, c'est-à-dire répandre le fumier dans les champs, où il reste exposé à l'air pendant toute la saison, c'est le gaspiller à plaisir ; il est certain que dans ces conditions le fumier n'exerce qu'une action fertilisante infiniment plus faible que lorsqu'il est enterré. L'auteur conseille aussi de renoncer à l'*épandage par la méthode des fumerons* (petits tas restant plusieurs jours, plusieurs semaines en place avant d'être éparpillés et enterrés). Il recommande « de conduire sur les mêmes pièces, et ensemble, la charrette à fumier et

1. Voir *Annales agronomiques*, t. XXIV, 1898, p. 401-416.

la charrue ; les hommes déchargeront le fumier en le tirant constamment de la voiture ; il sera étendu de façon que la charrue puisse immédiatement l'enterrer. S'il passe ainsi directement de la plate-forme à la terre sans séjourner à l'air, il ne subira plus que des pertes insignifiantes. »

NOTE L

Sur la conservation du fumier et sur les fermentations qui s'y produisent (Voir p. 559).

Cette question d'un intérêt capital pour l'agriculture a été particulièrement bien étudiée en France et par des chimistes de haute valeur, parmi lesquels on doit citer surtout MM. Dehérain, Gayon, Schlœsing, Müntz, Girard, Joulie, Gay et Dupont. Les mémoires où sont consignés les résultats obtenus par ces divers savants sont si nombreux, que nous devons nous contenter ici de citer les plus importants, sans avoir la prétention d'en faire l'analyse détaillée ; nous prions donc le lecteur de vouloir bien se reporter aux mémoires originaux.

Dans les *Annales de la science agronomique française et étrangère*, 2e série (1894-1895), t. II, p. 311-336, on trouvera un important rapport de M. Müntz : *Sur la conservation du fumier*, à la suite d'expériences faites avec M. Girard [1] sur des vacheries, des écuries, des bergeries, dans les conditions de la pratique agricole. Nous ne pouvons que renvoyer le lecteur à ce document dont nous donnons seulement une partie des conclusions ; elles sont conformes aux idées exprimées par Wollny.

« 1° Des pertes énormes d'azote se produisent à l'étable, sous les pieds des animaux, par suite de la fermentation ammoniacale ;

« 2° La nature de la litière a une grande influence sur ces pertes ; l'emploi de la tourbe et celui des terres riches en humus permettant de les éviter en partie ;

« 3° Les agents chimiques recommandés pour fixer l'ammoniaque sont neutralisés, c'est-à-dire annihilés par les bases fixes du fumier, et n'agissent que quand on emploie de grandes quantités de ces produits ; le résultat économique auquel devait conduire l'intervention de ces agents se trouve être ainsi en grande partie annulé.

« La recherche des procédés propres à entraver la déperdition de l'azote dans les fumiers a une importance pratique qu'on ne saurait méconnaître. Si, en effet, on parvenait à rendre au sol toute la matière azotée

---

1. Voir leur mémoire dans les *Annales agronomiques*, t. XIX, p. 5.

contenue dans les déjections des animaux, un résultat économique considérable serait atteint, et il deviendrait inutile de recourir à l'emploi des engrais commerciaux, tels que le nitrate de soude et le sulfate d'ammoniaque, que l'agriculture doit acheter à grands frais, pour la production des récoltes intensives... »

Dans le même recueil (2e série, 1897, t. Ier, p. 193-249), M. H. Joulie a publié un travail très étendu sur cette question d'un si haut intérêt pour l'agriculture : *Formation et conservation du fumier de ferme.* Il a cherché à déterminer ce qui se passe dans le tas de fumier, ce que devient le carbonate d'ammoniaque et quelles transformations subissent les matières végétales ; pour éliminer les causes d'erreur provenant du défaut d'homogénéité des masses de matières qui constituent le fumier de ferme, il a préparé des fumiers dans des conditions spéciales, imitant autant que possible les conditions de la pratique agricole, mais en quantités telles qu'il soit facile de tout recueillir et de tout analyser exactement. Après avoir étudié l'influence de la fermentation sur la conservation du fumier, il examine celle des diverses substances dont on a préconisé l'adjonction : le carbonate de chaux, la chaux, le sulfate de chaux, le phopshate de chaux, le superphosphate, le sulfate de magnésie, le sulfate de fer, l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique.

Voici les conclusions formulées par l'auteur :

« En fin de compte, nous arrivons à cette conclusion que de toutes les substances que nous avons ajoutées aux fumiers dans le but d'en assurer la conservation, les seules qui aient été efficaces sont les substances acides, et que la seule qui ait donné un résultat quelque peu avantageux est l'acide sulfurique.

« Mais l'emploi de cet acide ne laisse pas de présenter de nombreuses difficultés. Son transport est coûteux et difficile ; son maniement par des mains inexpérimentées peut amener de graves accidents. Il est donc peu probable que son usage se répande beaucoup dans les fermes, alors même que l'on trouverait un procédé économique de solidification permettant de l'expédier sans danger en poudre et en barils de bois. Des essais en ce sens ont été faits en Allemagne au moyen d'une matière silieeuse naturelle qui absorbe et solidifie une très forte proportion d'acide sulfurique, sans le saturer.

« La tourbe, qui existe en Allemagne sur un grand nombre de points, à la condition d'être bien desséchée et réduite en poudre fine, peut donner des résultats analogues. Enfin, on peut substituer à l'acide sulfurique le bisulfate de soude ou un superphosphate à excès d'acide sulfurique suffisamment plâtré pour être à peu près sec (c'est le superphosphate gypseux dont parle Wollny). Mais aucun de ces moyens ne peut permettre de faire arriver à la ferme de l'acide sulfurique libre à un prix inférieur à celui

de 5 fr. les 100 kilogr. que nous avons adopté dans nos expériences pour l'acide à 53°.

« Concluons donc que, dans l'état actuel de la science et de l'industrie, nous ne connaissons encore aucun moyen pratique d'empêcher les déperditions d'azote combiné qui se produisent pendant la conservation des fumiers.

« Les seuls conseils utiles que l'on puisse donner aux cultivateurs sont :

« 1° De tenir le fumier aussi humide que possible ;

« 2° D'éviter son échauffement, en l'arrosant fréquemment et en le tenant couvert ;

« 3° De le stratifier avec de la terre, à condition que celle-ci ne soit pas calcaire. La terre tourbeuse est celle qui convient le mieux à cet usage. »

Dans un dernier chapitre, M. Joulie recherche si la fermentation des fumiers exerce une influence sur l'assimilabilité des phosphates fossiles, et ses expériences l'amènent à conclure que l'introduction des phosphates dans les fumiers est une pratique vicieuse, puisque leur assimilabilité n'en est pas augmentée et qu'ils ont, au contraire, l'inconvénient d'augmenter les pertes d'azote à cause du carbonate de chaux qu'ils contiennent toujours en proportion plus ou moins forte. Cette conclusion s'applique, à plus forte raison, aux scories de déphosphoration qui contiennent de la chaux caustique, dont l'action sur le fumier serait encore plus fâcheuse au point de vue des déperditions d'azote.

Parmi les derniers travaux publiés sur cette importante question, l'on doit citer en première ligne ceux de M. P. Dehérain et de ses collaborateurs, MM. Gay et Dupont, qui sont insérés dans les *Annales agronomiques* (1898, p. 123-130 et p. 257-288 ; 1899, p. 401-421 ; et enfin, 1900, p. 273-295). Le mémoire publié par MM. Dehérain et Dupont en 1899 se termine par des conclusions dont nous ne citerons que la fin :

« Nous croyons que, pour éviter les pertes d'azote à l'état libre, il convient de provoquer dans le fumier une fermentation énergique, productrice à la fois d'acide carbonique et de formène ; le seul moyen à employer pour déterminer cette fermentation serait de maintenir la masse de fumier très alcaline par d'abondants arrosages de purin.

« Or, l'un de nous a montré, dans un mémoire précédent, que les pertes d'ammoniaque, plus à craindre que celles d'azote gazeux, ne se produisent jamais dans un milieu très chargé d'acide carbonique, et que, pour provoquer ce dégagement d'acide carbonique, il faut encore procéder à de fréquents arrosages avec le purin.

« D'où cette conclusion : Un fumier bien arrosé où s'établit une fermentation énergique, dégageant à la fois de l'acide carbonique et du gaz des marais pur, non mélangé d'hydrogène, ne perd ni ammoniaque, ni azote libre. »

Dans leur récent mémoire (*Ann. agronom.*, 1900, p. 273-295), MM. Dehérain et Dupont, s'appuyant sur les analyses des gaz confinés dans les tas de fumier expérimentés, ont cherché à répondre aux questions suivantes :

1° L'atmosphère du fumier est-elle habituellement assez chargée d'acide carbonique pour qu'on n'ait pas à craindre la dissociation du carbonate d'ammoniaque ?

Les chiffres constatés dans les tableaux montrent clairement que les pertes d'ammoniaque sont insignifiantes si l'on incorpore chaque jour les litières à la masse du fumier, et si on les maintient humides par des arrosages ;

2° La fermentation aérobie est-elle assez fréquente, dure-t-elle assez longtemps pour entraîner la dislocation complète de la matière azotée avec dégagement d'azote libre ? Et s'il en est ainsi, existe-t-il quelque moyen de restreindre la durée de cette fermentation aérobie ?

Il faut chercher à diminuer cette fermentation aérobie, extrêmement active à la partie supérieure de la masse, soit par un piétinement fréquent provoquant un tassement énergique, soit par des arrosages au purin ;

3° La fermentation hydrique se produit-elle habituellement dans le fumier en place ? Quelles sont les matières qui la subissent ? Peut-on la restreindre ?

Cette fermentation, caractérisée par le dégagement d'hydrogène, semble ne se produire aisément que dans un milieu neutre ou légèrement acide et cesser dès que les arrosages au purin rendent le fumier alcalin.

Cette fermentation hydrique étant parfois accompagnée d'un dégagement d'azote libre, il importe de la restreindre ; on y réussira par des arrosages copieux de purin ;

4° Enfin, comment peut-on favoriser l'établissement de la fermentation forménique qui ne paraît accompagnée d'aucun dégagement d'azote libre ?

Un fumier en fermentation forménique ne perd plus d'azote. Il importe donc de favoriser son établissement, ce à quoi on réussit par les arrosages au purin ; ils créent un milieu alcalin dans lequel les bactéries productrices de méthane restent seules en activité.

NOTE M

Système Guillaume pour le traitement des engrais organiques.

(Voir p. 561.)

Depuis 1883 fonctionne à Aubervilliers, près Paris, un système de traitement des vidanges, imaginé par M. Guillaume, qui repose sur les mêmes

principes que le système de *v. Podewils,* à Augsbourg, mais qui lui est supérieur en ce sens qu'il supprime tout contact des matières premières et de leurs produits de transformation avec l'atmosphère, depuis l'arrivée des vidanges à l'usine jusqu'à la sortie des engrais obtenus. M. Grandeau en rend compte dans les *Annales de la science agronomique française et étrangère,* 1888, t. Ier (p. 1-24), et en signale tous les mérites. « C'est, dit-il, une application industrielle complète du principe du travail en vases clos, recommandé par H. Sainte-Claire Deville en 1880. Encouragé par les conseils et l'appui de Sainte-Claire Deville, l'ingénieur inventeur de ce système a résolu pratiquement et économiquement le problème du traitement salubre des vidanges... Il arrive à dessécher, en vases hermétiquement clos, des matières infectes sans déverser dans l'atmosphère *aucune quantité* de gaz... Tous les desiderata exprimés dans le rapport de la commission d'assainissement de Paris m'ont paru réalisés par le procédé Guillaume, qui me semble constituer le plus grand progrès qui ait été accompli dans le traitement des vidanges, et résoudre la question hygiénique de ce traitement d'une manière complète. Depuis 1883, cette usine a fourni à l'agriculture des quantités considérables de poudrette. »

NOTE N

Sur la désinfection des engrais liquides.

(Voir p. 561.)

Le Dr *van Ermengem,* professeur à l'Université de l'État à Gand, a fait quelques recherches expérimentales dont les résultats permettent d'indiquer aux agriculteurs les substances dont l'emploi comme désinfectant peut être recommandé.

Les conclusions de ce travail, qui a paru dans les *Annales de la science agronomique française et étrangère* (2e série, 1896, t. Ier), sont les suivantes :

« Les engrais liquides, désinfectés au moyen de substances très actives au point de vue bactériologique, telles que le sulfate de cuivre, de zinc, le lysol, etc., gardent leurs propriétés fertilisantes et n'exercent aucune action nuisible sur la végétation.

« Le sulfate de cuivre et le sulfate de zinc conviennent surtout pour cette désinfection, à la dose de 20 kilogr. pour 20 mètres cubes de matières de vidanges, purin, etc., chaque fois qu'il s'agit d'une utilisation agricole des excréments.

« L'usage du sulfate de zinc, environ 20 p. 100 moins cher que le sulfate de cuivre, mérite particulièrement d'être proposé. »

Quant à l'acide sulfurique, encore moins cher et plus actif, il est d'un emploi trop difficile et trop dangereux dans les ménages et les fermes pour qu'on puisse le recommander.

NOTE O

Sur la production d'alcool chez les plantes supérieures, pendant la fermentation intramoléculaire. (Voir p. 580.)

Non seulement on a constaté la présence de l'alcool, comme le dit le Dr Wollny, mais on a mesuré les quantités d'alcool produites. MM. Godlewski et Folseniusz[1] ont déterminé avec une grande précision les quantités d'acide carbonique et d'alcool dégagées par des pois abandonnés dans le vide. Les gaz fournis par la respiration intramoléculaire sont formés exclusivement d'acide carbonique, et la quantité d'alcool produite correspond exactement à la formule de la fermentation alcoolique :

$$C^6H^{12}O^6 = 2\,C^2H^6O + 2\,CO^2.$$

D'après cette formule, à 100 parties de CO^2 dégagé correspond la formation de 104,5 de C^2H^6O ; la moyenne des chiffres trouvés par les auteurs est de 105,5.

En présence d'une solution de glucose, les phénomènes augmentent d'énergie et le glucose prend part à la production d'acide carbonique et d'alcool. Avec une solution de saccharose, il n'y a d'abord pas de changement dans l'intensité de la respiration ; mais le saccharose disparaît pour faire place à du glucose, grâce auquel alors les quantités d'acide carbonique et d'alcool augmentent.

Donc, en l'absence d'air, les cellules des plantes supérieures sont capables d'invertir le saccharose et de le transformer ensuite en alcool et acide carbonique. C'est un nouveau point de contact entre le ferment et la cellule végétale.

---

1. *Anzeiger der Ak. d. Wissensch. in Krakau,* juillet 1897. (Analysé dans *Annales agronomiques,* t. XXIV, 1898.)

NOTE P

Sur la marche de la température et de la fermentation dans l'ensilage des fourrages verts. (Voir p. 580.)

Dans les *Annales de la science agronomique française et étrangère*[1], MM. Vauchez et Marchal ont publié une excellente étude, très approfondie, sur l'ensilage d'un mélange de maïs et de pommes de terre. Toutes les conditions de l'expérience ont été minutieusement notées, ainsi que le tassement, la marche de la température et les produits de la fermentation qui ont été soigneusement analysés aux diverses époques et à diverses profondeurs du silo. Cet ensilage spécial avait surtout pour but de pousser jusqu'à ses dernières limites la fermentation des fourrages. Les auteurs ont atteint une température de 84° avec production, en ce point, d'un ensilage absolument noir. Nous ne pouvons ici que donner une partie des conclusions qu'ils ont été amenés à formuler, renvoyant, pour le surplus, le lecteur au mémoire lui-même.

« L'agriculteur, disent-ils, dispose de deux moyens pour la conservation du fourrage : 1° la dessiccation ou le fanage ; 2° l'ensilage.

« Ce dernier mode a sur le premier les avantages suivants :

« 1° Conserver au fourrage ensilé son eau et une valeur alimentaire plus grande, en augmentant sa digestibilité ; le trèfle incarnat, par exemple, ne fournit, fané, qu'un médiocre fourrage ; le maïs, lui, ne saurait être conservé autrement que par la fermentation ;

« 2° Donner à l'agriculteur l'indépendance vis-à-vis des circonstances météorologiques pour recueillir et sauver sa récolte ;

« 3° Permettre de varier toute l'année la nourriture du bétail.

« On peut définir l'ensilage : *la conservation des fourrages verts par des antiseptiques produits par la fermentation elle-même*.

« Cette définition ramène la question de l'ensilage à une question de fermentation.

« Savoir régler la fermentation, c'est savoir ensiler.

« Nous avons établi d'une façon indéniable le rôle important, essentiel même, joué par l'oxygène. De l'accès plus ou moins facile de l'air dans la masse ensilée dépendent la nature, l'intensité et la durée de la fermentation.

« La conduite d'un silo consiste donc à régler l'intervention de l'oxygène suivant la fermentation que l'on veut obtenir. Et nous savons pouvoir

1. Voir 2e série, 1900, t. II, p. 1-32.

arriver à ce résultat en agissant sur les facteurs facilitant les échanges de la masse ensilée avec le milieu extérieur, c'est-à-dire :

« 1° Par la forme du silo ;

« 2° Par la pratique de la mise en silo du fourrage ;

« 3° Par le chargement du tas à l'aide de matériaux. »

Suivent des instructions détaillées pour effectuer ces trois opérations dans les meilleures conditions possibles.

En les observant, il est facile d'arriver à un excellent ensilage. Il suffit de surveiller la température de la masse, température qui est un guide sûr, ne trompant jamais, à la condition qu'on sache interpréter les données recueillies.

Par des arrosages, par des chargements plus ou moins importants, par des tassements sur le fourrage, on peut régler la température et l'ensilage. On peut obtenir des produits très divers, allant depuis le gris verdâtre jusqu'au noir, en passant par les diverses teintes brunes. A chacune de ces couleurs correspond un ensilage particulier. Les deux fermentations extrêmes (gris verdâtre et noir) sont à éviter.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

B

D

R

S

U

V

TABLE DES MATIÈRES

DEUXIÈME PARTIE

PRODUITS DE DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

LES HUMUS

CHAPITRE III. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES HUMUS

Chapitre IV. — INFLUENCE DES HUMUS SUR LA FERTILITÉ DES SOLS

TROISIÈME PARTIE

INTERVENTION DE L'HOMME DANS LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES

Chapitre I. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Chapitre II. — COMMENT ON INFLUE SUR LA DÉCOMPOSITION DES MATIÈRES ORGANIQUES EN MODIFIANT LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU SOL

Nancy, impr. Berger-Levrault et Cie.

[illegible]

